

46
29

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA



**CONSOLIDÓMETRO CON VELOCIDAD
CONSTANTE DE DEFORMACIÓN**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A**

ENRIQUE IBARRA RAZO

MÉXICO, D.F.

1998



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico este trabajo a mi madre, por su tesón;

y a mi padre, en su memoria.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

20



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-090/95

Señor
ENRIQUE IBARRA RAZO
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. MANUEL J. MENDOZA LOPEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

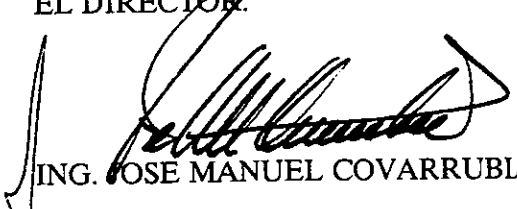
"CONSOLIDOMETRO CON VELOCIDAD CONSTANTE DE DEFORMACION"

- INTRODUCCION**
- I. TEORIA DE LA CONSOLIDACION BAJO DEFORMACION CONTROLADA**
 - II. DESCRIPCION DEL APARATO Y DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS**
 - III. CALIBRACIONES Y ENSAYES PRELIMINARES**
 - IV. COMPARACION DE RESULTADOS ENTRE CONSOLIDACIONES CON DEFORMACION CONTROLADA Y CON ESFUERZO CONTROLADO**
 - V. CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 09 de junio de 1995.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*nl1

**CONSOLIDÓMETRO CON VELOCIDAD
CONSTANTE DE DEFORMACIÓN**

Enrique Ibarra Razo

Director de Tesis: M. I. Manuel J. Mendoza López

CONTENIDO

CONTENIDO.....	iii
----------------	-----

INTRODUCCIÓN.....	1
GENERALIDADES.....	1
OBJETIVOS.....	2
ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	3
FINANCIAMIENTO Y DIRECCIÓN DEL PROYECTO.....	3

CAPÍTULO 1 TEORÍA DE LA CONSOLIDACIÓN BAJO DEFORMACIÓN

CONTROLADA.....	4
1.1 INTRODUCCIÓN.....	4
1.2 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS PARA ENSAYES DE CONSOLIDACIÓN CON VELOCIDAD CONSTANTE DE DEFORMACIÓN.....	5
1.2.1 Reseña histórica.....	5
1.2.2 Procedimientos.....	6
1.3 PROCEDIMIENTO ANALÍTICO DE SMITH Y WAHLS.....	6
1.3.1 Fundamentos.....	6
1.3.2 Definiciones y planteamiento del modelo matemático.....	7
1.3.3 Análisis de la ecuación que define el comportamiento de la relación de vacíos en los ensayos VCD.....	9
1.3.4 Soluciones de la ecuación diferencial de la consolidación.....	11
1.3.5 Determinación del valor medio del esfuerzo efectivo en los ensayos VCD.....	13
1.3.6 Determinación del coeficiente de permeabilidad.....	15
1.3.7 Determinación del coeficiente de consolidación.....	15
1.4 IMPLICACIONES DE LAS DETERMINACIONES ANALÍTICAS DE SMITH Y WAHLS.....	16
1.4.1 Variación de la relación de vacíos con la profundidad.....	16
1.4.2 Interpretación del cociente que forman la presión de poro que se mide en la base y el esfuerzo total aplicado, u_b/p	16
1.4.3 La velocidad constante de deformación como mecanismo para controlar el valor del cociente u_b/p	17
1.5 SELECCIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN ADECUADA PARA UN ENSAYE DE CONSOLIDACIÓN VCD.....	18
1.5.1 Método de Smith y Wahls para la determinación de velocidades en ensayos VCD.....	18
1.6 COMPENDIO.....	20

CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE

DATOS.....	22
2.1 INTRODUCCIÓN.....	22
2.2 FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL PROTOTIPO EN LA PRUEBA DE CONSOLIDACIÓN VCD.....	22
2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO VCD.....	24
2.4 APARATO DE PRUEBA.....	24
2.4.1 Máquina de compresión o tensión WF10026 TRITECH 10.....	26
2.4.2 Consolidómetro de anillo fijo.....	27
2.4.3 Transductor de presión de poro PDCR 810.....	29
2.4.4 Celda de fuerza TC-S.....	30
2.4.5 Transductor de desplazamiento DC-DC 240.....	32
2.5 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	33
2.5.1 Acondicionador de señales con fuente de poder NI SCXI-1121.....	34

2.5.2	Tarjeta de conversión analógica-digital A/D NI Lab-PC+	35
2.6	CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE ADQUISICIÓN DE DATOS	37
2.6.1	Operación del programa de adquisición de datos DAQWare	38
2.6.2	Operación del tablero de control del programa de adquisición de datos DAQWare	39
2.6.3	Arreglo e interpretación del archivo de datos	41
2.6.4	Descripción de la hoja de cálculo	43
2.7	COSTO DEL EQUIPO PROTOTIPO VCD Y COMPARATIVA CON DOS EQUIPOS VCD INTEGRALES EXISTENTES EN EL MERCADO	45
2.7.1	Costo del consolidómetro prototipo VCD	45
2.7.2	Costo de dos equipos VCD integrales existentes en el mercado	47
2.8	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS EQUIPOS PARA REALIZAR PRUEBAS DE CONSOLIDACIÓN CON VCD	48
2.8.1	Consolidómetro VCD de Carl B. Crawford	48
2.8.2	Consolidómetro VCD de Ronald E. Smith y Harvey E. Wahls	48
2.8.3	Consolidómetro VCD del Instituto Geotécnico Sueco	49
2.8.4	Participaciones mexicanas	50
2.8.5	Consolidómetro estándar normado por la ASTM	52
2.9	COMPENDIO	53
CAPÍTULO 3 CALIBRACIONES Y ENSAYES PRELIMINARES.....		54
3.1	INTRODUCCIÓN	54
3.2	VERIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN QUE SE INDICA EN EL TABLERO DE CONTROL DE LA MÁQUINA DE COMPRESIÓN TRITECH 10	55
3.2.1	Procedimiento	55
3.2.2	Observaciones	56
3.3	CALIBRACIÓN DEL TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DE PORO PDCR 810	57
3.3.1	Procedimiento	57
3.3.2	Observaciones	59
3.4	CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE FUERZA TC-S	60
3.4.1	Procedimiento	61
3.4.2	Observaciones	61
3.5	CALIBRACIÓN DEL TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO DC-DC 240	62
3.5.1	Procedimiento	63
3.5.2	Observaciones	64
3.6	PRUEBAS PRELIMINARES CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y EL PROGRAMA DAQWare	65
3.6.1	Procedimiento	65
3.6.2	Observaciones	66
3.7	DETERMINACIÓN DE LA DEFORMACIÓN DEL APARATO DE PRUEBA VCD PARA CORRECCIÓN DE DEFORMACIÓN DE LA MUESTRA	66
3.7.1	Procedimiento	66
3.7.2	Observaciones	67
3.8	CALIBRACIÓN DEL CONSOLIDÓMETRO TRADICIONAL	67
3.8.1	Calibración por compresibilidad	68
3.8.2	Calibración por fuerza recibida en la muestra	69
3.8.3	Observaciones	70
3.9	COMPENDIO	72
CAPÍTULO 4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE CONSOLIDACIONES CON DEFORMACIÓN CONTROLADA Y CON ESFUERZO CONTROLADO		73
4.1	INTRODUCCIÓN	73
4.2	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL	73
4.3	PROCEDIMIENTO DE PRUEBA DE LOS ENSAYES VCD	74
4.4	ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS	82

4.4.1	Efecto de la presión de poro en los ensayos VCD	82
4.4.2	Efecto de la velocidad de deformación en los ensayos VCD	87
4.4.3	Curvas de compresibilidad	90
4.4.4	Curvas de permeabilidad	94
4.4.5	Coefficiente de consolidación	98
4.5	PROPIEDADES MECÁNICAS Y TIEMPOS DE ENSAYE	101
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		104
5.1	Conclusiones	104
5.2	Recomendaciones	105
APÉNDICE A ECUACIÓN DIFERENCIAL DEL PROCESO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE ESTRATOS IDEALIZADOS DE ARCILLAS		106
A.1	Analogía mecánica de Terzaghi	106
A.2	Hipótesis de la teoría de la consolidación unidimensional	108
A.3	Consideraciones generales	109
A.4	Ecuación diferencial de la consolidación	110
A.4.1	Planteamiento	110
A.4.2	Otra forma de la ecuación diferencial de Terzaghi	113
APÉNDICE B SOLUCIONES DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DE LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL		115
B.1	Introducción	115
B.2	Solución de la ecuación diferencial de la consolidación para el caso simple de sustituir el valor de $b/r=0$ en la ecuación 1.9 de la relación de vacíos	115
B.3	Solución de la ecuación diferencial de la consolidación para el caso de sustituir el término $1+e$ por $1+\bar{e}$ en la ecuación 1.3	117
B.4	Obtención de la expresión para el coeficiente α en términos de b/r	119
APÉNDICE C EJEMPLO DE CÁLCULO DE VELOCIDAD CONSTANTE DE DEFORMACIÓN PARA UN ENSAYE VCD		121
C.1	Panorama general	121
C.2	Gráficas para estimar el coeficiente de consolidación c_v	122
C.3	Gráficas para estimar el índice de compresión c_c	124
C.4	Ejemplo de cálculo	125
REFERENCIAS		127

INTRODUCCIÓN

GENERALIDADES

El hundimiento de estructuras que se erigen sobre terrenos blandos, es un problema añejo que los constructores contemporáneos siguen enfrentando con frecuencia, sobre todo en aquellas regiones del mundo que cuentan, dentro de su formación geológica, con extensas capas de suelos compresibles.

Las construcciones cimentadas sobre el valle de México, padecen en forma peculiar de asentamientos diferenciales o totales, debido a la excepcional compresibilidad de las formaciones arcillosas en la Zona del Lago, así como a los espesores de estos depósitos, que en algunos lugares alcanza los 80 metros. Por otra parte, la densidad urbana siempre creciente y la extracción de agua del subsuelo del valle, han acelerado el proceso de asentamiento en muchas estructuras de nuestra ciudad de México, y en algunas de ellas se puede contar por varias decenas de centímetros y hasta en metros; baste citar el caso del Palacio de Bellas Artes ubicado en el centro de la ciudad.

Por las razones anteriores, la determinación en el laboratorio de las propiedades del suelo, que permitan predecir la magnitud de los asentamientos de una construcción, así como su evolución en el tiempo, es significativa para todo ingeniero de cimentaciones, y en particular para quien diseñe en la ciudad de México.

Usualmente, las propiedades de compresibilidad de los suelos finos, se determinan en el laboratorio con pruebas de consolidación unidimensional realizadas en un consolidómetro; la muestra de suelo se coloca dentro de un anillo y se somete a presiones incrementales crecientes, en donde cada esfuerzo aplicado es de igual magnitud al inmediato anterior y se mantiene durante 24 horas. Típicamente, este ensaye de consolidación se lleva a cabo con seis a ocho incrementos de carga, con los que se accede a igual número de estados de esfuerzo, registrando para cada uno de ellos las deformaciones que acusa el espécimen. Generalmente, la medición de las deformaciones se efectúa con micrómetro y su registro es manual, por lo que la reducción de los datos es de la misma forma, redundando en una tarea dilatada y tediosa. La labor experimental que se describe, aunada a la reducción de datos y graficación de resultados, consume de dos a tres semanas, lo que representa un período excesivo para la premura cotidiana con que se requieren algunos proyectos de ingeniería.

Con la intención de reducir el tiempo que se consume en la labor experimental de las pruebas de consolidación unidimensional como la arriba descrita, diversos investigadores crearon nuevas técnicas de laboratorio para determinar las características de compresibilidad de los suelos finos. De estas técnicas relativamente novedosas, la que más se ha empleado en otros países y de la que más se conoce, es la prueba de consolidación unidimensional con velocidad constante de deformación, que aquí se reconoce como prueba VCD.

La prueba de consolidación VCD, fue concebida originalmente por Hamilton y Crawford en 1959, y desde entonces ha tenido gran aceptación, primero con fines de investigación y posteriormente se adoptó como un ensaye rutinario en los laboratorios de Mecánica de Suelos de otros países. La experiencia y antecedentes en México del uso de ésta técnica son reducidos; el

Dr. W. Houston, entonces profesor de la Universidad de Berkeley en California, propuso la construcción de un prototipo de consolidómetro VCD durante su estadia sabática en el Instituto de Ingeniería-UNAM, hace unos 20 años.

La prueba VCD consiste básicamente en comprimir con velocidad constante a una muestra de suelo saturado alojada en un anillo metálico fijo a una base, permitiendo que drene por la cara superior. La compresión se realiza por la acción de una máquina que eleva al espécimen haciéndolo reaccionar contra un cabezal fijo a un marco de carga; por medio de un transductor de presión de poro se registra continuamente la presión intersticial en la base de la muestra, una celda de carga indica la fuerza con la que está reaccionando el suelo, mientras que un transductor de desplazamiento hace lo propio con las deformaciones.

El tiempo de duración de un ensaye VCD es típicamente de 48 horas si no es que menos, y de éste se obtienen curvas prácticamente continuas de los parámetros de compresibilidad, consolidación y permeabilidad del suelo estudiado. Por otra parte, el principio de operación de la prueba, permite automatizar con relativa facilidad la adquisición de datos y la reducción de los mismos, en lo que mucho ayudan las computadoras personales y otras herramientas digitales actuales.

Si se consideran las condiciones descritas de la técnica de consolidación convencional de esfuerzo controlado incremental, ECI, y de la técnica de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, se entenderá que esta última resulta muy ventajosa, siendo sus principales atributos la rapidez y la precisión con que se obtienen resultados.

OBJETIVOS

Considerando lo anterior, se resumen a continuación los objetivos de esta tesis:

1. Instrumentar y poner en marcha un aparato de prueba prototipo totalmente automatizado, con el que se puedan realizar ensayes de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD.
2. Describir en forma detallada los componentes del equipo prototipo y su modo de operación, para referencia de futuros operadores y como guía de aquéllos laboratorios que deseen constituir su propio consolidómetro VCD.
3. Con el equipo prototipo instrumentado, realizar una serie de ensayes de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, sobre muestras de arcilla de la ciudad de México, y presentar resultados de prueba.
4. Comparar los resultados de prueba de la serie de ensayes VCD, con los obtenidos en ensayes paralelos mediante la técnica tradicional de esfuerzo controlado incremental, ECI.
5. Concluir sobre el estudio comparativo, señalando ventajas y eventuales desventajas de una y otra técnica. Sugerir líneas de investigación en ensayes comparativos de acuerdo con los resultados observados. Finalmente, emitir recomendaciones sobre eventuales mejoras al equipo prototipo y el modo de operación.

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el capítulo 1, se presenta la teoría de análisis para los ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD; se comentan con detalle, aquéllos aspectos teóricos que tienen influencia significativa en la interpretación de los resultados.

Se describen los componentes que conforman el prototipo VCD en el capítulo 2, señalando su capacidad y funcionamiento en forma coordinada; se describe la tecnología empleada para la automatización de la prueba. Al final del capítulo, se hace un análisis del costo del consolidómetro prototipo.

En el capítulo 3, se describen detalladamente las técnicas empleadas para la calibración de los transductores y de la máquina de compresión del prototipo; se presentan gráficas de correlación con los datos obtenidos de las calibraciones y la forma de interpretarlas.

Los resultados de prueba y el estudio comparativo de la serie de ensayos de consolidación con VCD y ECI, se presentan en el capítulo 4, destacando cuatro aspectos fundamentales; éstos son: compresibilidad, permeabilidad, consolidación y tiempos de ensaye.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan los puntos concluyentes del trabajo.

FINANCIAMIENTO Y DIRECCIÓN DEL PROYECTO

La Agencia de Cooperación Internacional del Japón, JICA, aportó los recursos materiales al laboratorio de Dinámica de Suelos del Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, para desarrollar el consolidómetro VCD. La elección de los componentes, el diseño y la supervisión de la construcción del odómetro estuvieron a cargo del M. I. Manuel J. Mendoza López¹ y el Ing. Marcos Orozco Calderón².

¹ Investigador titular del Instituto de Ingeniería, UNAM; Jefe del laboratorio de Dinámica de Suelos, CENAPRED
² Becario de Maestría del Instituto de Ingeniería, UNAM

CAPÍTULO 1

TEORÍA DE LA CONSOLIDACIÓN BAJO DEFORMACIÓN CONTROLADA

1.1 INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la consolidación de una masa de suelo es un proceso hidrodinámico en el que la presión de poro en exceso de la hidrostática se disipa con el tiempo mediante expulsión de agua, disminuyendo el volumen de la masa; se origina cuando se aumentan las cargas actuantes sobre el terreno o se modifican los estados de esfuerzo efectivo original. Terzaghi (1943), señala que cualquier proceso que disminuya el contenido natural de agua de la masa de suelo saturada, sin sustitución del agua por aire, representa un proceso de consolidación; Juárez (1974) lo define como un proceso de disminución de volumen que tiene lugar en un lapso y que se provoca por un aumento de las cargas sobre el suelo.

Las pruebas de consolidación que se realizan en el laboratorio, son una representación aproximada del fenómeno que realmente ocurre en el campo; de ellas se obtienen los parámetros de compresibilidad y consolidación que el ingeniero de cimentaciones utiliza para el cálculo de la magnitud y la velocidad de los asentamientos debidos a la construcción de una estructura así como en el análisis de interacción estática suelo-estructura; adicionalmente, de la prueba se pueden conocer las características de permeabilidad de arcillas, en las que el empleo de métodos directos resulta poco práctico e incluso impreciso.

En México, las pruebas de consolidación se realizan tradicionalmente con la técnica de esfuerzo controlado incremental, ECI, con la que típicamente se tienen resultados en dos o tres semanas. Con la intención de reducir el tiempo que consume la labor experimental de los ensayos ECI, se creó la técnica alternativa de consolidación con velocidad constante de deformación, que aquí se reconoce como prueba VCD, cuyas características particulares permiten obtener resultados con extraordinaria rapidez (dos días), aventajando así a la técnica ECI.

La prueba VCD consiste en comprimir con velocidad constante de deformación a una muestra de suelo saturado alojada en un anillo metálico fijo a una base, permitiendo que drene por la cara superior. La compresión del espécimen se realiza por la acción de una máquina de compresión; por medio de un transductor de presión, se mide continuamente la presión de poro en la base impermeable de la muestra; de igual forma una celda de fuerza registra la carga con la que reacciona el suelo, mientras que un transductor de desplazamiento hace lo propio con las deformaciones.

La teoría de análisis tiene como fundamento la teoría de consolidación unidimensional de Terzaghi (1943), y además reconoce las condiciones de frontera particulares de la técnica VCD; con base en ésta se reducen los registros del ensayo, con lo que finalmente se obtienen relaciones prácticamente continuas de esfuerzo efectivo contra relación de vacíos, esfuerzo efectivo contra coeficiente de consolidación, permeabilidad contra relación de vacíos y otras.

En lo que sigue, se establecen los fundamentos de una teoría simple para el análisis de la prueba de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD; se plantea el modelo

matemático general con sus particulares condiciones de frontera y se presentan diversas soluciones con las que finalmente se obtienen expresiones para reducir los datos registrados durante los ensayos. A lo largo del texto, se destacan comentarios significativos sobre las implicaciones que tienen las suposiciones de la teoría.

1.2 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS PARA ENSAYES DE CONSOLIDACIÓN CON VELOCIDAD CONSTANTE DE DEFORMACIÓN

1.2.1 Reseña histórica

Hamilton y Crawford (1959), mencionaron por primera vez la realización de ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD; en su artículo, presentaron resultados de un programa experimental que incluía la realización de algunos ensayos VCD, cuyo objetivo era conocer el efecto de la velocidad de deformación en las curvas de compresibilidad. Ambos autores supusieron que en este tipo de ensayos se desarrollaban presiones intersticiales en grado considerable, ya que exhibieron menor compresibilidad comparada con la que obtuvieron en los ensayos ECI tradicionales. Debido a que en esta primera serie de ensayos VCD se careció del registro de las presiones de poro generadas en los especímenes, Hamilton y Crawford (1959) no pudieron establecer ninguna expresión para estimar el esfuerzo efectivo medio en la muestra, menos aún propusieron un procedimiento de análisis para el novedoso método de prueba, de tal forma que únicamente pudieron valorar curvas de compresibilidad (en las que el esfuerzo efectivo era en realidad esfuerzo total), así como cargas de preconsolidación, dejando de lado el coeficiente de consolidación c_v y el coeficiente de permeabilidad, k .

Posteriormente el mismo Crawford (1964), realizó una serie de tres ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación, en los que sí midió la presión de poro en la base de las muestras, y comparó las curvas de compresibilidad de estos ensayos con aquellas obtenidas mediante la técnica ECI. Más que una justificación de los ensayos VCD como una técnica rápida, Crawford (1964) pretendía demostrar el efecto, hasta entonces poco estudiado, de la velocidad de deformación en las curvas de compresibilidad. A pesar de que en esta serie de ensayos VCD se registró la presión intersticial en la base de las muestras, no se dedujo alguna expresión para estimar el esfuerzo efectivo medio.

No fue sino hasta un año más tarde cuando Crawford (1965), nuevamente reportó una serie de ensayos de consolidación con VCD, en los que calculó el esfuerzo efectivo medio en la muestra como el resultado del esfuerzo total aplicado menos la mitad del exceso de presión de poro que se midió en la base; sin embargo, no calculó los parámetros c_v y k . Casi al mismo tiempo que se presentaba el estudio anterior, Wahls y De Godoy (1965) reportaron una serie de ensayos VCD en los que calcularon el esfuerzo efectivo medio en la muestra como el resultado del esfuerzo total menos dos tercios de la presión de poro que se registró en la base.

Después de las publicaciones anteriores, Smith y Wahls (1969) presentaron el primer procedimiento de análisis para los ensayos de consolidación con VCD. El novedoso procedimiento introdujo hipótesis simplificadoras entre las que se encuentran incluidas algunas de la teoría de la consolidación de Terzaghi (1943) muy difundida; así, los autores establecieron de manera simple una expresión para calcular el esfuerzo efectivo medio en la muestra, además de que encontraron

expresiones para estimar, por primera vez en un ensaye de este tipo, el coeficiente de consolidación, c_v , y el coeficiente de permeabilidad, k .

1.2.2 Procedimientos

Sucedieron a la propuesta de Smith y Wahls (1969), otros procedimientos de análisis para los ensayes VCD; todos éstos introducen hipótesis simplificadoras que redundan en situaciones limitativas, algunos más que otros. Znidarcic *et al* (1984), presentan un estudio de todos los procedimientos existentes para analizar ensayes VCD, en el que se señalan ventajas y eventuales desventajas de cada uno de ellos.

A continuación, se listan los procedimientos conocidos:

- ◆ Procedimiento de Smith y Wahls (1969)
- ◆ Procedimiento de Wissa *et al* (1971)
- ◆ Procedimiento de Umehara y Zen (1980)
- ◆ Procedimiento de Lee (1981)

Para el análisis de los ensayes de consolidación VCD de este trabajo, que se presentan en el capítulo 4, se eligió el procedimiento de Smith y Wahls (1969), por resultar el más sencillo y quizá el más usado en otros países; además, los resultados observados en ensayes previos han demostrado la eficiencia del método. En las siguientes secciones se presenta el desarrollo y las soluciones del procedimiento referido. Es oportuno destacar que el procedimiento de Wissa *et al* (1971) es utilizado en el procedimiento estándar de ensayes de consolidación con velocidad controlada de deformación, según la norma ASTM D4186 (1989).

1.3 PROCEDIMIENTO ANALÍTICO DE SMITH Y WAHLS

1.3.1 Fundamentos

Durante los ensayes de consolidación con velocidad constante de deformación, se registra en forma continua la presión de poro en la base impermeable de la muestra, además de la fuerza total aplicada y la deformación. Para establecer una ecuación que exprese el comportamiento del esfuerzo efectivo en este tipo de ensayes, es necesario obtener una relación entre la presión de poro que se mide en la base del espécimen y el valor medio existente en la muestra; Smith y Wahls (1969) establecen dicha relación en un modelo matemático que se obtiene de una teoría simple. El modelo que ambos autores proponen permite estimar en forma continua, el coeficiente de consolidación, c_v , el coeficiente de permeabilidad, k , además, por supuesto de la curva de compresibilidad. La formulación del modelo de Smith y Wahls, es semejante al de la teoría unidimensional de Terzaghi (1943) y retoma algunas, pero no todas, de las hipótesis de la misma teoría, a saber:

1. El suelo es homogéneo y se encuentra en estado saturado
2. El agua y las partículas sólidas son incompresibles
3. Se cumple la ley de Darcy para el flujo de agua a través de materiales porosos

4. El suelo esta confinado lateralmente
5. Los esfuerzos totales y efectivos son iguales en cualquier punto de una sección horizontal, en cualquier etapa del proceso

Sobre la base de estas hipótesis, se formula la ecuación diferencial de la consolidación unidimensional, cuyo desarrollo se presenta en el apéndice A de este trabajo; tal ecuación resulta:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad 1.1$$

en donde k , es el coeficiente de permeabilidad, e , la relación de vacíos y u , el exceso de presión de poro en la muestra. Si a las hipótesis anteriores se les incorporan las restantes de la teoría de Terzaghi (1943), se llega a la ec. 1.2, que es la expresión más común y conocida de la ecuación diferencial de la consolidación; su desarrollo también se presenta en el apéndice A de este trabajo:

$$\frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad 1.2$$

Se trata entonces de resolver la ec. 1.1 para obtener una función que represente la variación de la presión de poro en la muestra con la profundidad, z , y el tiempo, t . Si se supone que k es una función del valor medio en la muestra de la relación de vacíos, \bar{e} , e independiente de la posición, z , se tendría que $k=f(\bar{e}, t)$, por lo que la ec. 1.1 se puede escribir ahora en la forma:

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad 1.3$$

La suposición anterior será válida en la medida en que la variación de la relación de vacíos con la profundidad en la muestra durante el ensaye, sea pequeña. En otras secciones de este capítulo se analizan con detalle las implicaciones de esta suposición.

1.3.2 Definiciones y planteamiento del modelo matemático

En la prueba de consolidación VCD, la velocidad de deformación de la muestra es constante; esto aunado al confinamiento lateral que significa que el área transversal de la muestra, A , se mantenga constante, implica que la variación del volumen de la muestra por unidad de tiempo resulte de la misma forma, por lo que tal variación puede expresarse como:

$$\frac{dV}{dt} = -RA \quad [L^3T^{-1}] \quad 1.4$$

en donde R , es la velocidad de deformación constante de la cara superior de la muestra y A , el área de la sección transversal de la muestra. El signo negativo de la ec. 1.4, indica el decremento de volumen con el tiempo.

Por las hipótesis de la teoría de consolidación que se presentaron con anterioridad, la variación del volumen de la muestra por unidad de tiempo, que se expresa mediante la ec. 1.4, es igual a la variación del volumen de vacíos por unidad de tiempo, que evidentemente resulta también constante. Si en la ecuación anterior se dividen ambos términos entre el volumen de sólidos de la muestra V_s , se obtiene la variación de la relación de vacíos media en la muestra con el tiempo, que resulta igualmente constante y se expresa como:

$$\frac{d\bar{e}}{dt} = \frac{1}{V_s} \frac{dV}{dt} = \frac{-RA}{V_s} = -r \quad [T^{-1}] \quad 1.5$$

en donde V_s , es el volumen de sólidos; la relación de vacíos media en la muestra, \bar{e} , se expresa por:

$$\bar{e} = \frac{1}{H} \int_0^H e dz \quad 1.6$$

en donde H es el espesor del espécimen.

La ec. 1.6, refleja el hecho de que en un proceso de consolidación unidimensional, para un tiempo dado, t , las diferentes secciones horizontales de la muestra tienen diferentes estados de esfuerzo; lo que implica, entre otras cosas, que la relación de vacíos en la muestra no es constante sino que sigue una ley de variación que depende de la profundidad, z , y del tiempo, t . De las ecs. 1.5 y 1.6 se deduce que la relación de vacíos para cualquier posición y tiempo se expresa como una función lineal de la forma:

$$e(z, t) = e_0 - g(z)t \quad 1.7$$

en donde e_0 , es la relación de vacíos inicial de la muestra y $g(z)$, es una función que depende de la profundidad únicamente. En efecto, si se conoce la relación de vacíos inicial, e_0 , de una sección horizontal del suelo y se desea conocer ahora la nueva relación de vacíos que ésta adquiere transcurrido un tiempo de ensaye, t , basta con disminuir de e_0 el producto de la constante de variación de vacíos con el tiempo de la sección, r_s , y el tiempo transcurrido, t , lo cual se expresa de la siguiente forma:

$$e = e_0 - r_s t \quad 1.8$$

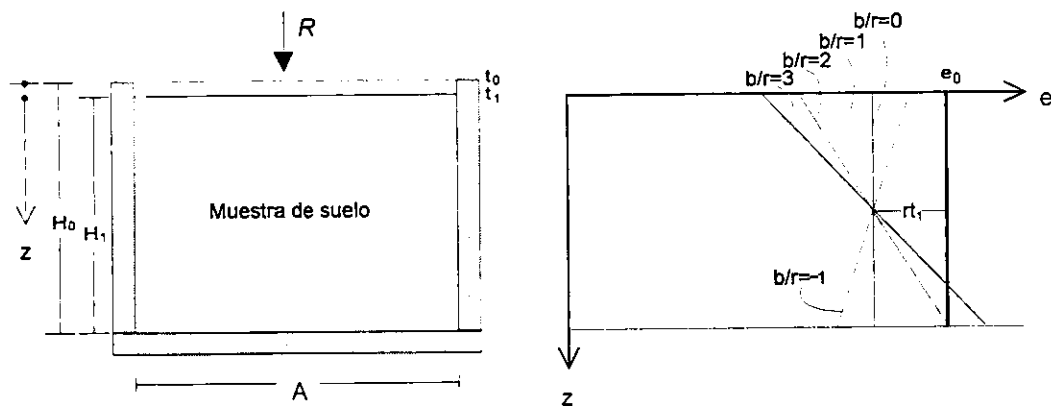
en donde r , para cada sección varía únicamente con la profundidad, z ; es decir, $r_s = g(z)$. El problema consiste en encontrar la función $g(z)$. Smith y Wahls (1969), proponen una solución sencilla y suponen una función lineal para $g(z)$, que al sustituirse en la ec. 1.7 resulta en:

$$e = e_0 - rt \left[1 - \frac{b}{r} \left(\frac{z - 0.5H}{H} \right) \right] \quad 1.9$$

en donde b , es una constante del suelo que depende de la variación de la relación de vacíos con la profundidad y el tiempo. La ec. 1.9 es la esencia del modelo matemático de Smith y Wahls (1969) y por tanto merece su análisis. En lo que sigue se examina la ec. 1.9; inicialmente se trata el significado y efecto de la constante b y, en general, la forma y variación de la citada ecuación con la profundidad y el tiempo.

1.3.3 Análisis de la ecuación que define el comportamiento de la relación de vacíos en los ensayos VCD

Considérese la fig. 1.1 en la que se ilustra la sección vertical media de una muestra de suelo sometida a consolidación con velocidad constante de deformación, en un tiempo $t=t_1$, así como la gráfica correspondiente de la relación de vacíos con la profundidad, $e-z$. Las líneas $e-z$ que se dibujan en la gráfica, se calcularon con la ec. 1.9, para lo que se consideró unitaria la constante de variación de la relación de vacíos con el tiempo, r ; y se varió el valor de la constante b para observar el comportamiento de las líneas.



R , velocidad constante de deformación de la cara superior
 H_0 , altura inicial
 H_1 , altura para el tiempo $t=t_1$
 A , área de la muestra
 z , profundidad
 e , relación de vacíos
 e_0 , relación de vacíos inicial

Figura 1.1 Variación de la relación de vacíos con la profundidad para el mismo instante, en una muestra de suelo con diferentes valores del parámetro b

Una inspección de la fig. 1.1 proporciona información importante: las líneas $e-z$ son rectas en las que se tienen relaciones de vacíos mayores a profundidades mayores (únicamente para valores positivos de la constante b); la relación adimensional b/r , representa la pendiente de rectas $e-z$, que giran respecto a un punto situado en $z=H/2$ y $e=e_0-rt_1$, lo que en otras palabras significa, que el valor de b/r influye de manera directa en la tasa de variación de la relación de vacíos en la muestra con la profundidad; para $b/r=0$, la línea $e-z$ representa una relación de vacíos constante con la profundidad; la variación de la relación de vacíos, e , con la profundidad, z , crece en la medida que el valor de la relación b/r aumenta; para valores de b/r mayores a 2, se tienen en la base de la muestra valores de e mayores a la relación de vacíos inicial, e_0 ; para valores negativos de b/r , se tienen pendientes invertidas.

De las observaciones anteriores, se puede concluir que el cociente b/r es indicativo de la forma en que la relación de vacíos de la muestra varía con la profundidad; los valores razonables que puede tomar la relación b/r van desde 0 hasta 2, ya que valores negativos indican que la relación de vacíos disminuye con la profundidad, y valores mayores a 2 indican que la relación de vacíos en la base de la muestra es mayor a la inicial, siendo ambos casos irreales para una prueba de consolidación VCD; finalmente, se concluye que a mayores valores del cociente b/r se tienen mayores variaciones de la relación de vacíos con la profundidad.

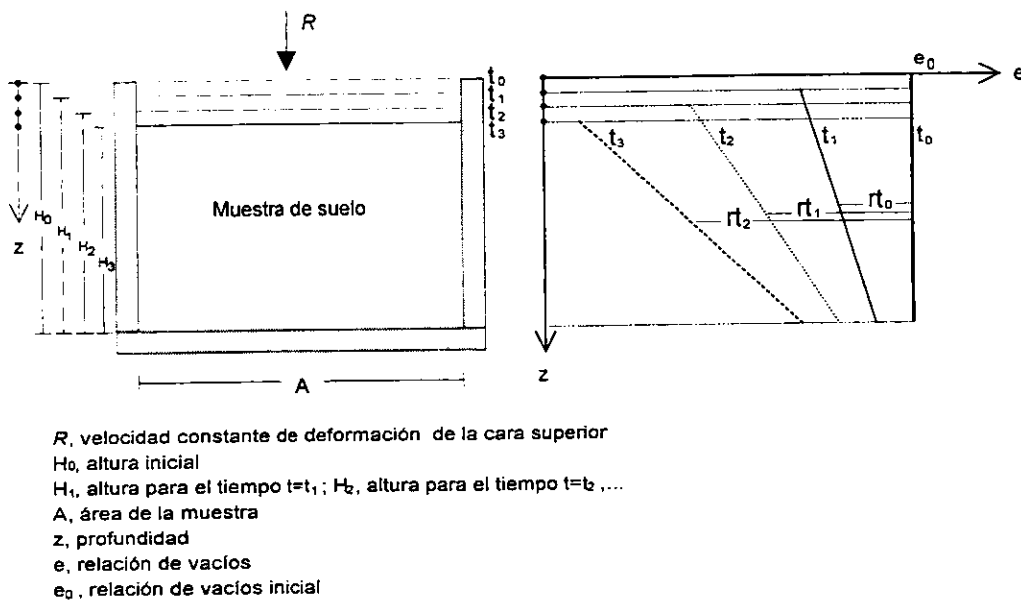


Figura 1.2 Isócronas de la relación de vacíos con la profundidad en una muestra de suelo, para $b/r=1$

Considérese ahora la fig. 1.2 en la que se grafican isócronas de la relación de vacíos con la profundidad en una muestra de suelo, sometida a consolidación con velocidad constante. Las isócronas se calcularon con la ec. 1.9, para lo que se consideraron unitarias las constantes r y b ($b/r=1$). Del análisis de la fig. 1.2 se deducen algunos datos significativos: para el tiempo $t_0=0$ en el que la muestra no se ha deformado, la relación de vacíos a cualquier profundidad corresponde, evidentemente, a la inicial, e_0 ; para cualquier tiempo t mayor que 0, la variación de la relación de vacíos con la profundidad corresponde a una línea recta en la que se tienen relaciones de vacíos

mayores a profundidades mayores, según se dijo antes; la variación de la relación de vacíos con la profundidad es siempre creciente con el tiempo, es decir, la pendiente de las rectas disminuye proporcionalmente al tiempo; valores mayores de r , significan mayores variaciones de la relación de vacíos con la profundidad para un mismo tiempo, t .

Las observaciones anteriores, tienen particular importancia por el hecho de que en la ecuación diferencial 1.3 que se pretende resolver, se considera una relación de vacíos media en el espécimen, suposición que será tanto menos representativa del fenómeno real de consolidación, como mayor sea la variación de la relación de vacíos con la profundidad en la muestra.

Znidarcic *et al* (1984), señalan que la ec. 1.9 tiene la desventaja de que involucra el parámetro b del suelo que no se conoce y no existe un método para determinarlo. Se debe decir que en la actualidad existen muchos resultados publicados que ofrecen una extensa referencia sobre el valor de b , asociado con r , que se debe adoptar para determinado ensaye y tipo de suelo. En general, se ha observado que el valor de $b/r=1$ ofrece resultados más cercanos a los que se obtienen con la técnica convencional ECI, y es precisamente este valor el que se utiliza en el análisis de los ensayos VCD que se presentan en el capítulo 4.

1.3.4 Soluciones de la ecuación diferencial de la consolidación

Una vez que se estableció y analizó la función que representa el comportamiento de la relación de vacíos en la muestra a cualquier profundidad y tiempo (ec. 1.9), se sustituye en la ecuación diferencial 1.3, con lo que esta última puede resolverse directamente mediante doble integración con respecto a z , en lo que se deben cumplir las condiciones de frontera $u(0,t)=0$ y $\frac{\partial u}{\partial z}(H,t)=0$. A continuación se presentan diversas soluciones de la ec. 1.3; en el apéndice B de este trabajo se realiza el desarrollo de las mismas.

Para el caso simple de considerar el valor de $b/r=0$ en la ec. 1.9 (equivalente a considerar constante la relación de vacíos con la profundidad), la solución de la ecuación diferencial 1.3 queda de la forma:

$$u = \frac{\gamma_w r}{k(1+e)} \left(Hz - \frac{z^2}{2} \right) \quad 1.10$$

que si bien resulta una expresión sencilla, también se puede afirmar que representa burdamente las condiciones del fenómeno de consolidación pues, según se ha dicho, la relación de vacíos no es constante con la profundidad, por lo que el uso de la ec. 1.10 debe ser precavido y más bien no es aconsejable.

Ahora bien, si se consideran en la ec. 1.9 valores de b/r diferentes de cero, la solución de la ec. 1.3 se expresa como:

$$u = \frac{\gamma_w r}{k} \left\{ zH \left(\frac{1+e_0 - bt}{rt(bt)} \right) + \frac{z^2}{2rt} - \left[\frac{H(1+e_0)}{rt(bt)} \right] \left[\frac{H(1+e)}{bt} \ln(1+e) - z \ln(1+e_B) - \frac{H(1+e_T)}{bt} \ln(1+e_T) \right] \right\} \quad 1.11$$

en donde:

$$e_T = e_0 - rt \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{b}{r} \right) \right] \quad 1.12$$

y

$$e_B = e_0 - rt \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{b}{r} \right) \right] \quad 1.13$$

representan la relación de vacíos en la superficie ($z=0$) y en la base de la muestra ($z=H$) respectivamente.

Debido a la complejidad de la ec. 1.11, es conveniente obtener una solución simplificada de la ecuación diferencial 1.3; para ello se sustituye el término $1+e$ de la ec. 1.3 por $1+\bar{e}$, donde \bar{e} , que se expresa por la ec. 1.6, representa el valor medio de la relación de vacíos, por lo que no es función de z , entonces se tiene que la solución conduce a una ecuación más sencilla en la forma:

$$u = \frac{\gamma_w r}{k(1+\bar{e})} \left[\left(Hz - \frac{z^2}{2} \right) - \frac{b}{r} \left(\frac{z^2}{4} - \frac{z^3}{6H} \right) \right] \quad 1.14$$

la cual representa el comportamiento de la presión de poro en la muestra a cualquier profundidad y tiempo durante el ensaye de consolidación con velocidad constante de deformación. Es precisamente la ec. 1.14 la que se utiliza para analizar el desarrollo de la presión intersticial en los ensayos VCD que se presentan en el capítulo 4.

La sustitución del valor puntual e , por el valor medio en la muestra \bar{e} , que se hace en la ec. 1.3 para obtener la solución que arriba se presenta, implica nuevamente la necesidad, o limitación, de mantener una variación mínima de la relación de vacíos con la profundidad durante los ensayos VCD.

A partir de la ec. 1.14, puede obtenerse una expresión para la presión de poro en la base de la muestra, la cual se mide durante el ensaye de consolidación con VCD; ésta se obtiene si se sabe que en la base de la muestra $z=H$, y se sustituye el valor correspondiente en la citada ecuación, lo que resulta en:

$$u_{z=H} = u_b = \frac{\gamma_w r H^2}{k(1+\bar{e})} \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12} \right) \right] \quad 1.15$$

donde u_b es precisamente la presión de poro en la base. La ecuación anterior es de gran utilidad para la evaluación de otros parámetros, según se deduce en el resto de este capítulo.

1.3.5 Determinación del valor medio del esfuerzo efectivo en los ensayos VCD

Hasta aquí, se han encontrado las ecuaciones que describen el comportamiento de la relación de vacíos y la presión de poro de un suelo sometido a consolidación con VCD, para cualquier tiempo y profundidad; ahora se requiere establecer una ecuación que determine el esfuerzo efectivo medio en la muestra, $\bar{\sigma}$, con lo que finalmente se pueden estimar las curvas de esfuerzo efectivo contra relación de vacíos, también conocidas como curvas de compresibilidad. La expresión del esfuerzo efectivo medio en la muestra durante un ensayo VCD, se puede escribir en la forma:

$$\bar{\sigma} = p - \bar{u} \quad 1.16$$

en donde p , es el esfuerzo total aplicado que se mide durante el ensayo, y \bar{u} es el valor medio de la presión de poro en la muestra. Una expresión para estimar la presión de poro media, \bar{u} , se obtiene con la integral definida de 0 a H de la ec. 1.14, y dividida entre la altura o espesor H ; tal integral resulta:

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u dz = \frac{\gamma_w r}{k(1+\bar{e})} \left[\left(\frac{H^2}{3} \right) - \frac{b}{r} \left(\frac{H^2}{24} \right) \right] \quad 1.17$$

Nótese que la expresión anterior involucra la permeabilidad, k ; que aún no ha sido definida por ninguna expresión; por ello es conveniente, sino necesario, escribir la ec. 1.17 en términos de un parámetro que se registre durante el ensayo; es decir, la presión de poro en la base, u_b . Si se divide y multiplica a la vez la presión de poro media, \bar{u} , por u_b , se tiene que:

$$\bar{u} = \frac{\bar{u}}{u_b} u_b = \alpha u_b \quad 1.18$$

en donde el coeficiente α es el cociente del valor medio de la presión de poro en la muestra, \bar{u} , y la presión de poro en la base, u_b . Al efectuar tal división, la cual se desarrolla en el apéndice B, se presenta el hecho afortunado de que el coeficiente α resulta ser únicamente función de b/r , en la forma:

$$\alpha = \frac{\bar{u}}{u_b} = \frac{\frac{1}{H} \int_0^H u dz}{u_b} = \frac{\frac{1}{3} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{24} \right)}{\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12} \right)} \quad 1.19$$

Finalmente, la ec. 1.16 se puede escribir ahora como:

$$\bar{\sigma} = p - \alpha u_b \quad 1.20$$

de tal suerte que la presión efectiva media en la muestra, se calcula en función de las variables que se registran durante la prueba, a saber: la fuerza total aplicada, con la que se obtiene p ; la velocidad de deformación de la cara superior de la muestra, con la que se obtiene r ; y la presión de poro en la base, u_b .

Además de estas tres variables, en la ec. 1.20 se involucra el parámetro de distribución de la relación de vacíos con la profundidad b/r ; es por esto conveniente observar el comportamiento de α cuando se hace variar la relación b/r en el intervalo práctico de 0 a 2, lo que se ilustra en la fig. 1.3.

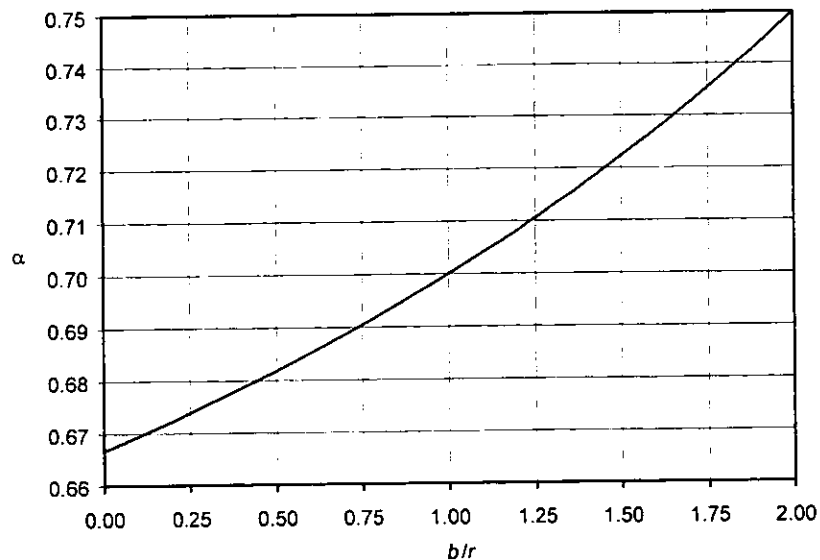


Figura 1.3 Variación del coeficiente α con b/r

Las variaciones de b/r tienen apenas un pequeño efecto sobre el coeficiente α y por tanto sobre el esfuerzo efectivo medio. En el análisis de los ensayos que se presentan en el capítulo 4, se adoptó el valor intermedio $b/r=1$ con su asociado α de 0.7 que, según Smith y Wahls (1969), ofrece resultados más cercanos a los que se obtienen de la prueba convencional ECI; sin embargo, debido a la pequeña influencia de b/r contra α , se justifica ampliamente que se asuma el valor $b/r=0$, lo que lleva a un valor $\alpha=2/3$ y a simplificaciones de análisis y cálculo (Mendoza *et al.*, 1996). La experiencia sueca (Larsson, 1981), señala la conveniencia de utilizar este último valor.

1.3.6 Determinación del coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad, k , se obtiene directamente de la ec. 1.15 que define la presión de poro en la base de la muestra, u_b . Si se observa la expresión citada, se notará que el único término desconocido es precisamente la permeabilidad, k ; en efecto, debido a que la presión de poro en la base, u_b , se mide durante todo el desarrollo del ensaye, además de que el cociente b/r se puede igualar de 0 a 2, bastará con despejar k de la ec. 1.15 para obtener una expresión de la permeabilidad en términos conocidos, así se tiene que:

$$k = \frac{\gamma_w r H^2}{u_b (1 + \bar{e})} \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12} \right) \right] \quad 1.21$$

que es la ecuación que se utiliza para calcular la permeabilidad de los suelos en los ensayos de consolidación con VCD. Obsérvese que el coeficiente de permeabilidad no es una función de la profundidad, z , sino del valor medio de la relación de vacíos, \bar{e} , tal como se estableció al inicio de este capítulo para la obtención de la ecuación diferencial 1.3.

1.3.7 Determinación del coeficiente de consolidación

Terzaghi (1943), definió el coeficiente de consolidación, c_v , (referirse al final del apéndice A) como:

$$c_v = \frac{k(1 + e)}{a_v \gamma_w} \quad 1.22$$

en donde a_v es el coeficiente de compresibilidad, que representa la pendiente de cualquier punto de la curva de compresibilidad, es decir: $a_v = d\bar{e}/d\bar{\sigma}$. Anteriormente se definieron las ecuaciones con las que se obtiene la mencionada curva, de tal forma que a_v se evalúa directamente de ella.

Si se sustituye el término e por \bar{e} en la ec. 1.22 y además se sustituye en la misma ecuación la expresión 1.21 que define al coeficiente de permeabilidad, k , se obtiene una ecuación del coeficiente de consolidación en los siguientes términos:

$$c_v = \frac{r H^2}{a_v u_b} \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12} \right) \right] \quad 1.23$$

con la que se evalúa el coeficiente c_v en los ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación. Nuevamente se destaca la importancia de la variación de la relación de vacíos con la profundidad en los ensayos VCD, al suponer válida la sustitución de e por \bar{e} para obtener la ec. 1.23.

1.4 IMPLICACIONES DE LAS DETERMINACIONES ANALÍTICAS DE SMITH Y WAHLS

1.4.1 Variación de la relación de vacíos con la profundidad

La ec. 1.9 que define la relación de vacíos a cualquier profundidad y tiempo, se obtiene de la suposición simple de ser una función lineal del tiempo y de la profundidad; las implicaciones de esta suposición fueron comentadas con anterioridad en este mismo capítulo.

Para resolver la ecuación diferencial de la consolidación, se consideró la conveniencia de sustituir de ésta el término puntual de la relación de vacíos, e , por el valor medio en la muestra, \bar{e} , con lo que se obtuvo una solución de expresión muy simple (ec. 1.14); tal ecuación será tanto más precisa conforme la tasa de variación de la relación de vacíos con la profundidad de la muestra sea pequeña; es por ello que se insistió en repetidas ocasiones en la necesidad de mantener una variación mínima en los ensayos VCD. Sin embargo, los adjetivos “pequeña” y “mínima” no dicen nada al lector, ya que son términos relativos: ¿hasta dónde será grande la variación de la relación de vacíos y hasta dónde pequeña?; así mismo, no existe una forma de evaluar directamente tal variación.

Por lo arriba expuesto, se ha encontrado un parámetro empírico que parece manifestar, por sí mismo, la tan citada variación de la relación de vacíos, e , con la profundidad, z , el cual ofrece rangos prácticos para determinar la precisión del método de análisis de Smith y Wahls (1969). En lo que sigue, se explica con detalle en qué consiste el parámetro empírico referido.

1.4.2 Interpretación del cociente que forman la presión de poro que se mide en la base y el esfuerzo total aplicado, u_b/p

Considérese la isócrona de la fig. 1.4, que representa la variación del estado de esfuerzo efectivo y de la presión de poro en un tiempo, t , de una muestra de suelo durante un proceso de consolidación con velocidad constante de deformación; la forma de la curva que representa las presiones de poro, se calculó con la ec. 1.14. Evidentemente en la frontera superior de la muestra ($z=0$) donde existe drenaje libre, la presión de poro es nula, mientras que en la base impermeable de la muestra la presión intersticial, u_b , corresponde a la máxima para ese instante.

De la distribución casi parabólica de la presión intersticial en la muestra, se infiere lo siguiente: si la presión de poro en la base, u_b , es alta en relación al esfuerzo total aplicado, p , (ambas cantidades se miden directamente durante el curso del ensaye) se tienen esfuerzos efectivos, σ , mucho mayores en la parte superior que en la inferior, consecuentemente relaciones de vacíos menores en la parte alta de la muestra que en la baja. Lo anterior muestra claramente que la variación de la relación de vacíos con la profundidad para un tiempo dado t , es dependiente del valor del cociente u_b/p ; en efecto, entre mayor sea el valor de este cociente, mayor será la variación de e con z y por tanto las hipótesis de la teoría de Smith y Wahls (1969) son menos aplicables.

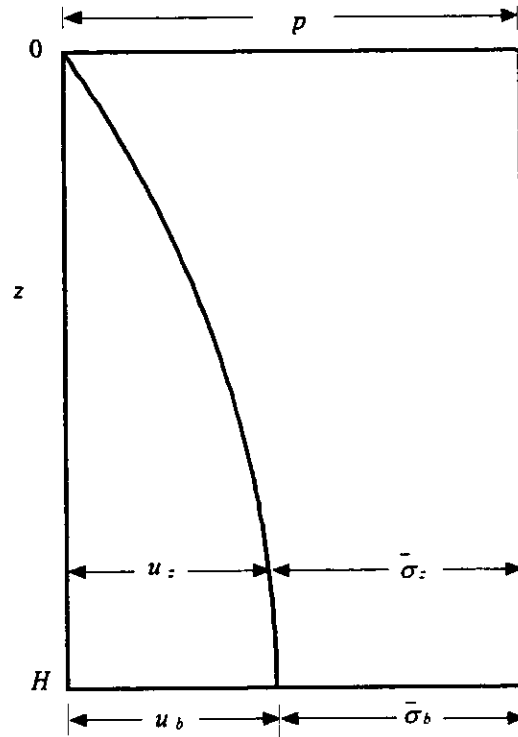


Figura 1.4 Estado de esfuerzo en la muestra para un tiempo, t , durante un ensayo VCD

De la experiencia acumulada en ensayos previos se ha delimitado el intervalo del cociente u_b/p para el cual se consideran confiables los resultados del ensayo VCD; así, los primeros en considerar el cociente u_b/p como un punto medular de la prueba VCD, fueron Smith y Wahls (1969), quienes observaron que los ensayos en los que el cociente no rebasó el 50%, acusaron gran similitud cuando fueron comparados con los resultados de ensayos tradicionales de esfuerzo controlado incremental, ECI. Por su parte, Sällfors (1975) recomienda que el cociente u_b/p no rebase el 15%, mientras que la norma ASTM D4186 (1989), señala que éste debe mantenerse entre 3% y 30%. En el capítulo 4, se analiza con detalle la relación u_b/p y sus efectos en los ensayos VCD.

1.4.3 La velocidad constante de deformación como mecanismo para controlar el valor del cociente u_b/p

Resulta evidente que en un ensayo VCD los valores de u_b/p sólo se conocen *a posteriori*; es decir que únicamente se podrá observar el comportamiento de la presión de poro en la base de la muestra una vez que el ensayo se inicie, y hasta entonces se puede verificar si se rebasa o no el valor límite de tan citado cociente. Esta situación implicaría desechar un buen número de pruebas si acaso en estas se rebasase el valor deseado de u_b/p , lo cual es a todas luces inapropiado, ya que suprime de tajo las supuestas bondades de rapidez de los ensayos VCD.

De ensayos previos, se ha observado que existe una estrecha relación entre la velocidad de deformación constante, R , a que se somete la muestra de suelo y los valores que pueda tomar el

cociente u_v/p ; en efecto, para un suelo particular, mayores velocidades de deformación provocan mayores relaciones u_v/p . Por lo anterior, resulta comprensible pensar que una de las variables en las que se ha puesto mayor atención desde la aparición de los ensayos VCD, es precisamente la velocidad de deformación de los ensayos. El problema consiste en conocer con que velocidad se debe ensayar un cierto tipo de suelo para no generar grandes presiones de poro en la base y por tanto mayores relaciones u_v/p .

La complicación anterior se soluciona, en parte, si se considera que en ensayos previos se han sentado suficientes referencias de velocidades constantes de deformación en diferentes tipos de suelo, que provocan relaciones u_v/p dentro de un intervalo determinado; Larsson (1981), por ejemplo, recomienda velocidades de 0.012% de deformación unitaria por minuto, con lo que se logran cocientes de u_v/p menores al 15%; por otra parte, existen algunas expresiones con las que se calculan velocidades de deformación para los ensayos VCD que en teoría producen relaciones u_v/p dentro de un intervalo predeterminado. En la siguiente sección se presenta uno de estos métodos, y en el apéndice C se desarrolla un ejemplo de cálculo.

1.5 SELECCIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN ADECUADA PARA UN ENSAYE DE CONSOLIDACIÓN VCD

En la realización de pruebas de consolidación con VCD, debe seleccionarse una velocidad de deformación tal que no se exceda cierto valor de la relación u_v/p . Algunos autores proponen velocidades estándar (Janbu *et al*, 1981; Larsson, 1981; Leroueil, 1988; Mesri y Feng, 1992), ya que se ha observado que con la utilización de éstas se mantiene siempre la relación u_v/p dentro de valores permisibles. En la literatura, existen datos acerca de las velocidades que se usan comúnmente en los ensayos VCD y los resultados obtenidos. En el capítulo 4 se presenta una sección en la que se precisan intervalos de velocidades recomendados por los autores mencionados arriba, con los que se “garantizan” resultados confiables en los ensayos VCD.

Por otra parte, existen algunos métodos (Smith y Wahls, 1969; ASTM D4186, 1989) con los que se calculan velocidades de deformación tales que provoquen valores de u_v/p dentro de un cierto intervalo predeterminado por el usuario. A continuación se presenta el método de Smith y Wahls (1969) para la determinación de velocidades de ensayos VCD y en el apéndice C se desarrolla un ejemplo del mismo.

1.5.1 Método de Smith y Wahls para la determinación de velocidades en ensayos VCD

El método de Smith y Wahls (1969) para el cálculo de velocidades de deformación en ensayos VCD, retoma la ec. 1.23 que define el coeficiente de consolidación, c_v , y supone el conocimiento *a priori* de este parámetro para un cierto rango de esfuerzo. Con el valor predeterminado de c_v , y un valor límite del cociente u_v/p , previamente fijado por el usuario, se realizan algunas simplificaciones y sustituciones en la ec. 1.23, con lo que finalmente se obtiene la tan buscada expresión de la velocidad, R .

La filosofía del método puede parecer contradictoria a primera vista, ya que son precisamente los valores del coeficiente c_v , los que se buscan determinar de la prueba misma de consolidación; sin embargo, existen en la literatura gráficas de correlación con las que se pueden

estimar valores de este parámetro, conocido el contenido natural de agua del suelo por ensayar (apéndice C). A continuación se presenta el desarrollo del método.

La constante de variación de la relación de vacíos con el tiempo, r , que aparece en la ec. 1.23 también puede expresarse en términos de la altura de sólidos, h_s , en la forma siguiente:

$$r = \frac{RA}{V_s} = \frac{RA}{h_s A} = \frac{R}{h_s} \quad 1.24$$

donde la altura de sólidos para una muestra de suelo, se puede definir en términos de la altura inicial, H_0 , y de la relación de vacíos inicial, e_0 :

$$h_s = \frac{H_0}{1 + e_0} \quad 1.25$$

Por su parte, el coeficiente de compresibilidad, a_v , que aparece en la ec. 1.23, se define ahora por una correlación empírica en términos del índice de compresión, c_c , (pendiente de la porción virgen de la curva de compresibilidad) y resulta:

$$a_v = \frac{c_c}{2.3p} \quad 1.26$$

Si se substituyen las ecs. 1.24, 1.25 y 1.26, en la ec. 1.23 y además se considera la expresión que define al esfuerzo efectivo medio en la muestra ($\bar{\sigma} = p - \alpha u_b$, ec. 1.20), se obtiene una expresión que involucra la velocidad de deformación, R , en la forma:

$$RH^2 = c_v c_c \left(\frac{H_0}{1 + e_0} \right) \left(\frac{\frac{u_b}{p}}{1 - \alpha \left(\frac{u_b}{p} \right)} \right) \left(\frac{5.22}{6 - \frac{b}{r}} \right) \quad 1.27$$

Smith y Wahls (1969), consideran la conveniencia de sustituir en la ecuación anterior el valor de $b/r=1$ y su asociado valor para el coeficiente $\alpha=0.7$, con lo que se logra una simplificación en la siguiente forma:

$$RH^2 = 1.04 c_v c_c \left(\frac{H_0}{1 + e_0} \right) \left(\frac{\frac{u_b}{p}}{1 - 0.7 \left(\frac{u_b}{p} \right)} \right) \quad 1.28$$

donde la altura H , se refiere a la altura que tendría la muestra en el momento en el que el valor límite de la relación u_b/p predeterminado por el usuario, se alcance. Smith y Wahls (1969) observaron que este valor límite se presenta normalmente cuando el espécimen tiene entre el 40% y el 70% de la altura inicial; con base en lo anterior se puede escribir:

$$H = mH_0 \quad 1.29$$

en donde m es una constante de proporcionalidad que varía normalmente entre 0.4 y 0.7, según se dijo antes. Si se sustituye la ec. 1.29 en la ec. 1.28, y además se considera válido sustituir el factor 1.04 por la unidad, la expresión 1.29 se expresa finalmente como:

$$R = \frac{c_v c_c}{m^2 H_0 (1 + e_0)} \left(\frac{\frac{u_b}{p}}{1 - 0.7 \left(\frac{u_b}{p} \right)} \right) \quad 1.30$$

que es la ecuación con la que se calcula la velocidad que genera una relación u_b/p máxima previamente fijada por el usuario.

Al comienzo de la prueba e_0 y H_0 se conocen, deberá entonces elegirse un valor máximo deseado del cociente u_b/p , así como un valor para la constante m . Lo único que se desconoce en la ec. 1.30 para obtener la velocidad de deformación, R , son el coeficiente de consolidación y el índice compresibilidad c_v y c_c . Estos últimos valores se estiman con gráficas de correlación para lo que se requieren las propiedades índice del material por ensayar.

En el apéndice C, se presenta un ejemplo práctico de cálculo de velocidad de deformación, R , en un ensaye VCD sobre una arcilla de la cd. de México, en el que se utiliza la ec. 1.30 con un valor máximo de $u_b/p=15\%$; así mismo, se presentan gráficas para estimar el coeficiente de consolidación, c_v , y el índice de compresión, c_c , conocido el contenido natural de agua del suelo.

1.6 COMPENDIO

En este capítulo se presentan los fundamentos, el planteamiento y las soluciones del modelo simple de Smith y Wahls (1969), para la interpretación y reducción de los resultados experimentales de los ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD. Como producto de este modelo matemático, se obtuvieron las ecs. 1.9, 1.20, 1.21 y 1.23, con las que finalmente se determinan las relaciones $\bar{e} - \bar{\sigma}$, $k - \bar{e}$ y $c_v - \bar{\sigma}$ de los suelos ensayados bajo esta técnica.

La teoría en la que se basa el modelo o procedimiento estudiado, involucra hipótesis e idealizaciones con las que se simplifican las soluciones analíticas, de tal forma que resulta un método muy accesible y práctico para estudiar los ensayos VCD.

La precisión del método se relaciona estrechamente con el grado de variación en la muestra de la relación de vacíos, e , con la profundidad, z , durante el ensaye.

La interpretación y efecto de la relación u_v/p que se mide directamente en los ensayos, tiene una importancia relevante, ya que ésta indica, por sí misma, la tan mencionada variación de e con z ; así se puede afirmar que a mayores valores de u_v/p se tienen mayores variaciones de la relación de vacíos con la profundidad y por tanto el método estudiado pierde precisión.

Intimamente ligada con los valores de u_v/p , se encuentra la velocidad de deformación constante, R , con que se ensayan las pruebas VCD, por lo que la selección de ésta es un punto medular de la técnica.

Una objeción importante al método de Smith y Wahls (1969), es la que se refiere al parámetro b del suelo (indica la variación de la relación de vacíos con la profundidad y el tiempo) que está presente en casi todas las ecuaciones, ya que como señalan Znidarcic *et al* (1984), éste no puede conocerse *a priori* y no existe un método para determinarlo, a menos que se ejecuten otras pruebas de referencia. Es oportuno advertir en favor del método, que el parámetro desconocido b , siempre se asocia en la forma b/r , y con base en la experiencia de ensayos previos, se ha observado que cualquier valor entre 0 y 2 parece tener poca influencia en los resultados.

Se concluye que el procedimiento de análisis de Smith y Wahls (1969) para los ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación es un método simple y de uso confiable. Las repercusiones de las hipótesis y simplificaciones del método en los resultados, serán menores en la medida que el cociente u_v/p se mantenga reducido.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

2.1 INTRODUCCIÓN

La prueba de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, requiere de equipo especializado tanto para la realización del ensaye mismo, como para la adquisición y reducción automática de los datos. El equipo VCD que aquí se describe es un prototipo formado por elementos que se conjuntaron para obtener como producto final un consolidómetro VCD que funciona eficientemente.

En el presente capítulo, se describe el funcionamiento general de la prueba de consolidación con velocidad constante de deformación; se describen cada uno de los componentes que integran al equipo prototipo, señalando su principio de trabajo, características físicas, características de operación, así como su funcionamiento en forma coordinada con otros componentes. Se destaca el sistema de adquisición de datos y se indica el tipo de programación que se utiliza para la reducción de los mismos. Se presenta un análisis comparativo del costo del equipo prototipo que aquí se describe y el de dos equipos VCD integrales existentes en el mercado; finalmente, se hace una breve reseña de la evolución de los equipos para realizar pruebas de consolidación con VCD.

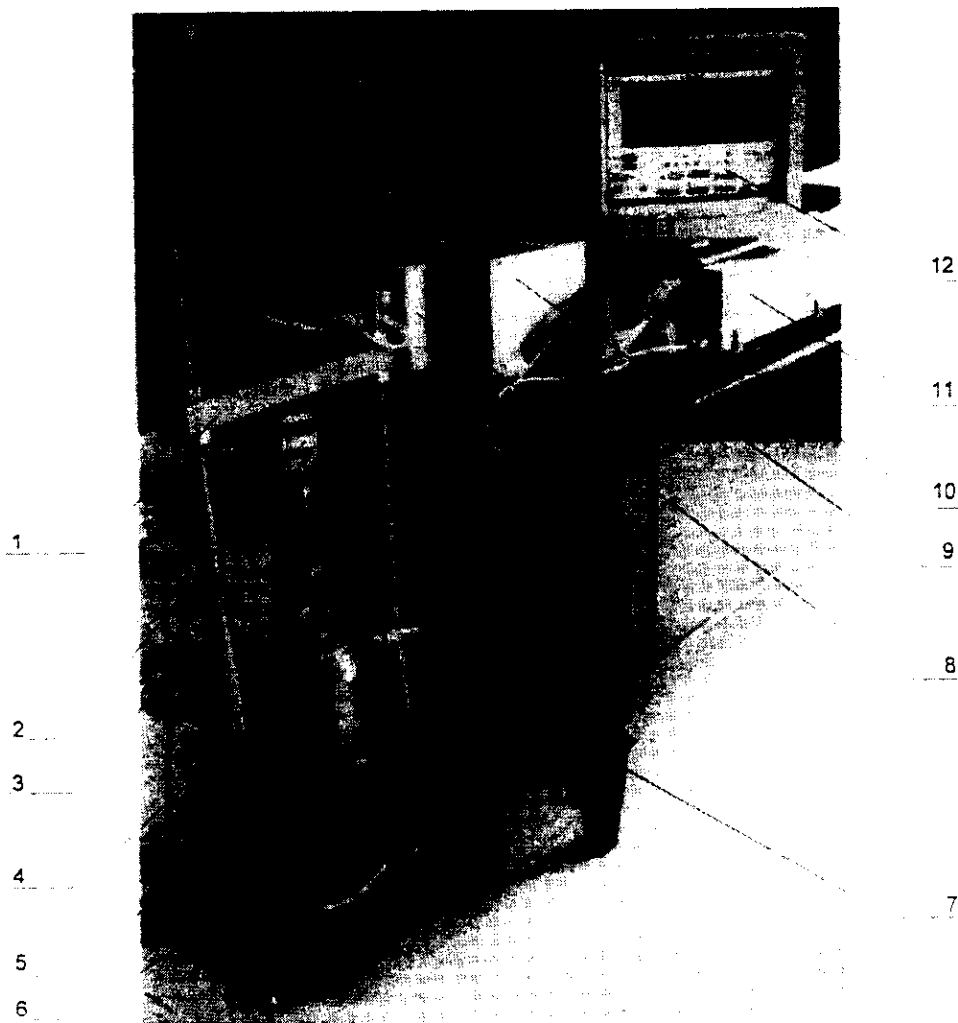
2.2 FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL PROTOTIPO EN LA PRUEBA DE CONSOLIDACIÓN VCD

La prueba de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, consiste en comprimir con velocidad constante a una muestra de suelo saturado que se aloja en un anillo metálico fijo a una base, permitiendo que drene sólo por la cara superior. La compresión se realiza por la acción de una máquina de compresión.

Por medio de un transductor de presión, se registra la presión de poro en la base de la muestra; una celda de fuerza indica la carga con la que reacciona el suelo mientras que un transductor de desplazamiento hace lo propio con las deformaciones.

Las señales analógicas de voltaje que emiten los transductores, se acondicionan mediante un acondicionador de señales para luego transformarse en registros digitales por medio de una tarjeta de conversión analógica-digital A/D, la cual se instala dentro de una computadora. Las señales se toman periódicamente. Los registros digitalizados se almacenan automáticamente en un archivo temporal en la memoria de la PC. Un programa se encarga del control de la adquisición de registros y del monitoreo de la prueba; una hoja de cálculo hace lo propio con la reducción de los registros, para lo que se utilizan algoritmos con las ecs. 1.9, 1.20, 1.21 y 1.23 que se presentan en el capítulo 1. Al finalizar el ensaye, se obtienen de manera automática relaciones prácticamente continuas del esfuerzo efectivo contra la relación de vacíos, del esfuerzo efectivo contra el coeficiente de consolidación, del coeficiente de permeabilidad contra relación de vacíos y otras.

Las velocidades constantes de deformación que se aplican a los ensayos VCD, oscilan normalmente en el intervalo de 0.006% a 0.030% de deformación unitaria por minuto, lo que lleva a tiempos típicos de ensaye de 1 ó 2 días. Si se considera que la reducción de los registros es automática, con la técnica VCD es posible obtener las gráficas de los parámetros de compresibilidad, consolidación y permeabilidad del suelo que se estudie prácticamente al concluir la labor experimental. En la fig. 2.1 se muestra una vista del prototipo VCD durante un ensaye.



- 1 Viga de reacción de la máquina de compresión
- 2 Celda de fuerza
- 3 Transductor de desplazamiento
- 4 Consolidómetro de anillo fijo
- 5 Pedestal que soporta al consolidómetro y aloja al transductor de presión de poro
- 6 Máquina de compresión
- 7 Válvula de la línea para saturación
- 8 Terminal de conectores de los transductores
- 9 Acondicionador de señales
- 10 Cable que conduce las señales filtradas y amplificadas a la tarjeta de conversión A/D
- 11 Tarjeta de conversión A/D instalada en PC
- 12 Monitoreo de la prueba

Figura 2.1 Vista del consolidómetro prototipo VCD durante un ensaye

2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO VCD

Dentro del conjunto de elementos que integran el equipo prototipo VCD, se distinguen tres categorías de acuerdo a la naturaleza de su función, a saber: el *aparato de prueba*, el *sistema de adquisición de datos* y los elementos de *programación*. Conforman el aparato de prueba, los componentes que intervienen físicamente en el ensaye de consolidación. El sistema de adquisición de datos lo constituyen aquellos dispositivos que participan en la alimentación eléctrica, acondicionamiento de las señales analógicas y conversión de éstas en registros digitales. Los elementos que gobiernan la toma periódica de lecturas de los transductores y conducen el flujo de registros mediante algoritmos hasta reducirlos a los parámetros de compresibilidad, consolidación y permeabilidad del suelo ensayado, constituyen la programación.

En la fig. 2.2, se ilustra un diagrama con los componentes del equipo prototipo clasificados según las categorías que se mencionan arriba; las flechas del diagrama esquematizan el flujo de acciones durante el ensaye. Obsérvese que éstas corren en una sola dirección, por lo que se trata de una prueba con sistema abierto, es decir, que no existe retroalimentación.

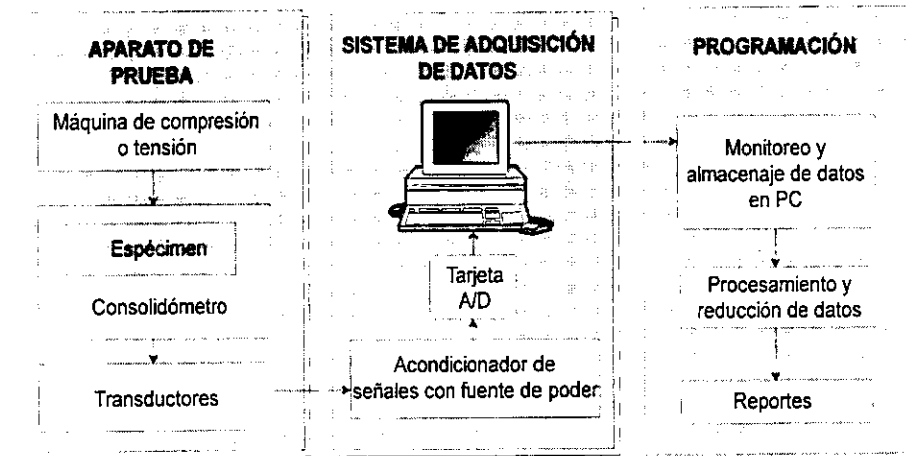


Figura 2.2 Diagrama de los componentes del equipo prototipo VCD; sistema abierto (ilustración adaptada de Chan et al, 1992)

2.4 APARATO DE PRUEBA

El aparato de prueba del equipo prototipo VCD, está compuesto por la máquina de compresión o tensión, el consolidómetro de anillo fijo, el transductor de presión de poro, la celda de fuerza y el transductor de desplazamiento. En la fig. 2.3 se muestra un esquema del aparato de prueba en conjunto; obsérvese la colocación de los componentes referidos.

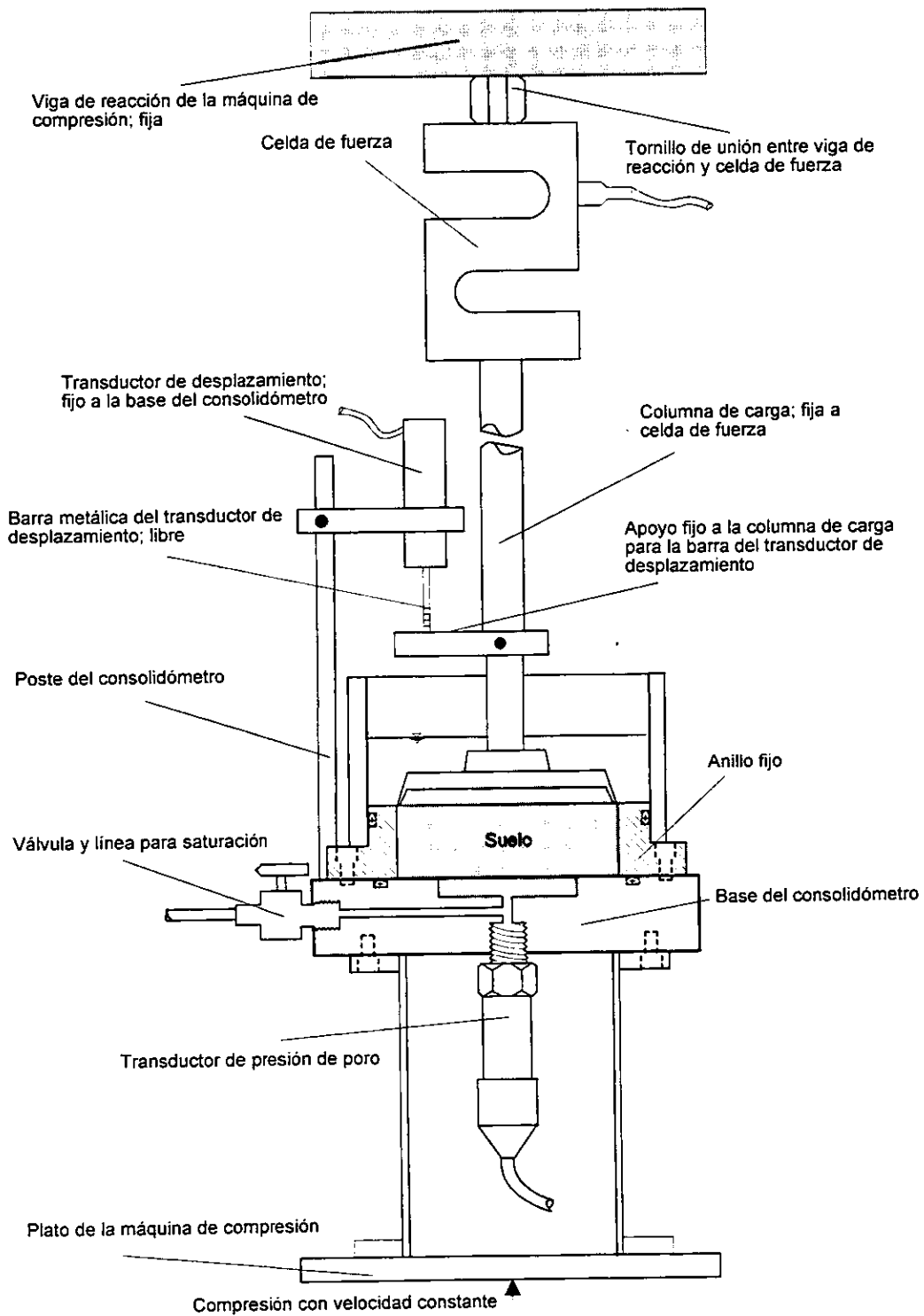
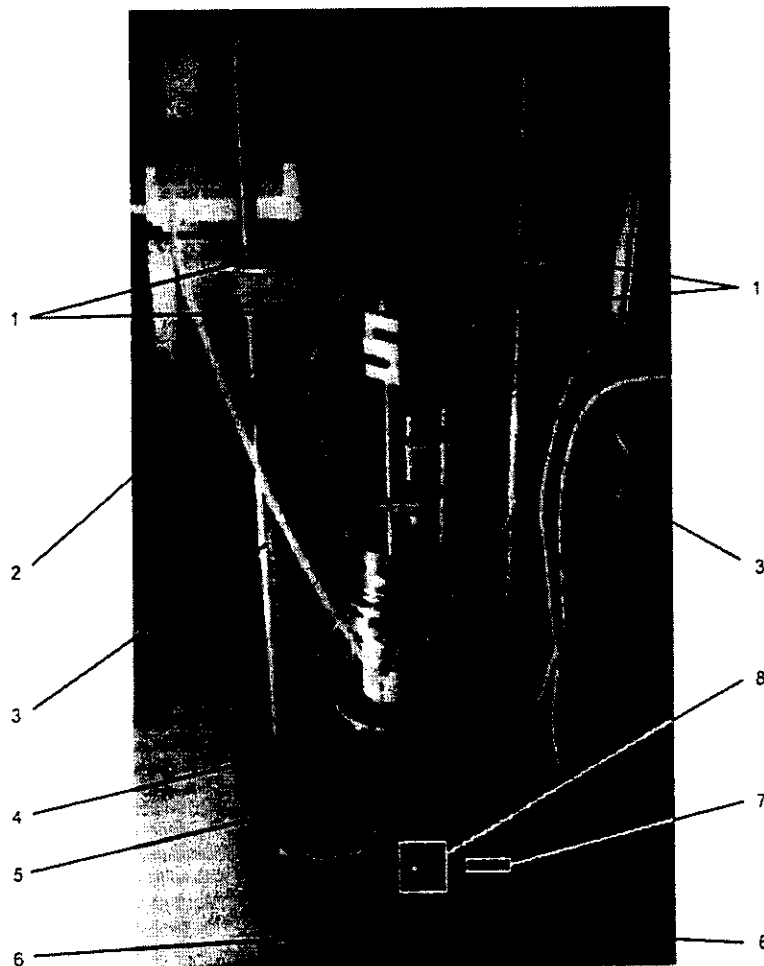


Figura 2.3 Esquema de conjunto del aparato de prueba prototipo durante un ensaye VCD

2.4.1 Máquina de compresión o tensión WF10026 TRITECH 10

La máquina de compresión o tensión, es un marco de carga que comprime con velocidad de deformación constante a la muestra de suelo; en lo sucesivo se hará referencia a ésta nombrándola únicamente como máquina de compresión. Básicamente funciona por la acción de un motor eléctrico de gran precisión que activa un sistema de engranes y un tornillo sinfín; este último mueve verticalmente un plato a velocidad constante, de forma tal que al estar la máquina activa, cualquier elemento que se coloque sobre el plato se comprime o tensa con velocidad constante contra una viga rígida que se encuentra fija a dos postes. La capacidad máxima para compresión o tensión es de 10 kN (1020 kg). En la fig. 2.4 se ilustra una fotografía en la que se señalan las partes principales de la máquina de compresión.



- 1 Sistema de tuercas para ajustar y nivelar la viga de reacción
- 2 Viga de reacción
- 3 Postes
- 4 Plato de compresión
- 5 Motor eléctrico, sistema de engranes y tornillo sinfín oculto dentro del chasis
- 6 Patas para nivelar la máquina de compresión
- 7 Seleccionador de velocidades
- 8 Botones del tablero de control

Figura 2.4 Vista de la máquina de compresión WF10026 TRITECH 10

A continuación se listan las especificaciones generales de la máquina de compresión:

Marca	Wykeham Farrance Engineering Limited
Modelo	WF10026 TRITECH 10
Máxima fuerza de compresión	10 kN (1020 kg)
Intervalo de velocidades constantes	0.00001 a 5.99999 mm/min
Diámetro del plato	158 mm
Carrera del plato	70 mm
Peso total	37 kg

El usuario puede seleccionar la velocidad del plato de la máquina de compresión dentro del intervalo de 0.00001 mm/min a 5.99999 mm/min, para ello dispone de un tablero de control situado en la parte frontal del chasis que envuelve al motor y al sistema de engranes. El tablero de control está conformado por el seleccionador de velocidades, donde se digita la velocidad para el ensaye, así como de 5 botones (puntos 7 y 8 de la fig. 2.4). Mediante dos de estos botones se elige el sentido de movimiento del plato (hacia arriba para compresión o hacia abajo para descarga); otros dos sirven para mover rápidamente el plato en ambos sentidos con la finalidad de colocarlo en alguna posición conveniente, y finalmente un botón de parada de movimiento. Cuando la máquina de compresión está activa, el sentido de movimiento del plato (hacia arriba o hacia abajo) se indica mediante una luz verde que destella dentro del botón seleccionado.

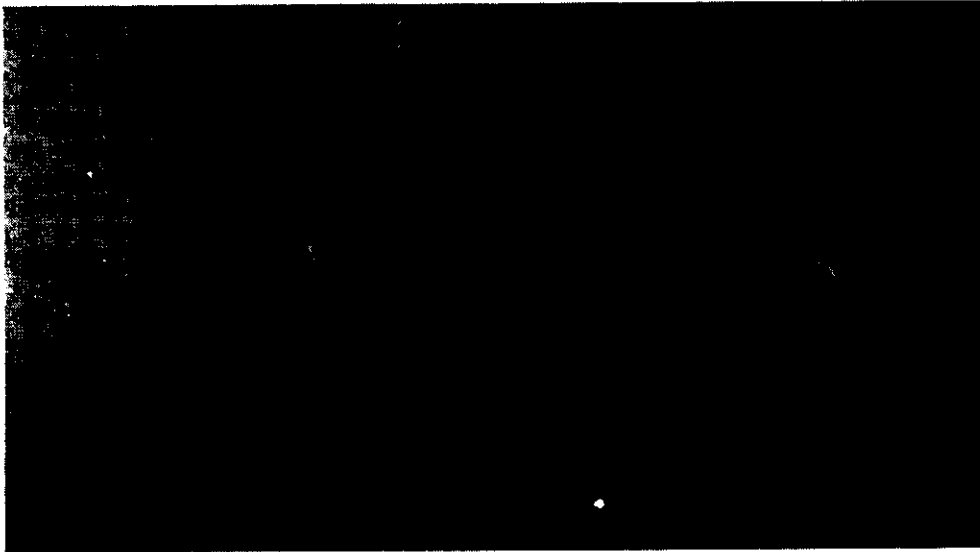
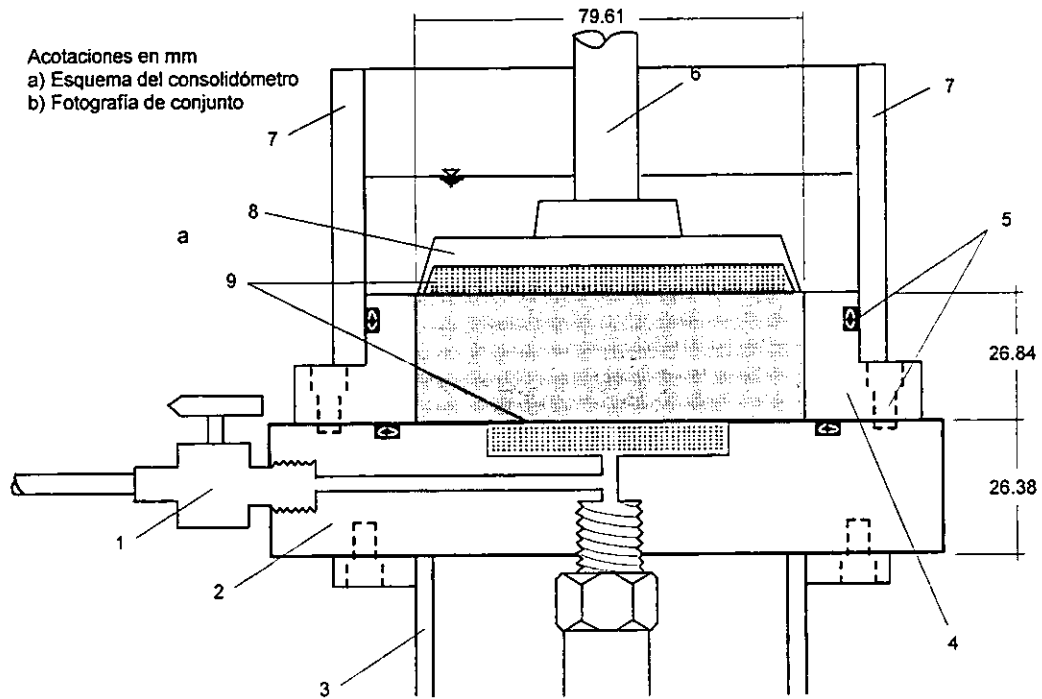
El diámetro del plato es de 158 mm y cubre un recorrido máximo de 70 mm. Si durante el ensaye se rebasa el límite de carrera del plato, la máquina para automáticamente su marcha. La máquina de compresión debe colocarse en posición horizontal, para ello cuenta con 4 patas móviles en su base, tal como se indica en la fig. 2.4.

La viga de reacción que se encuentra en la parte superior de la máquina de compresión, cubre un claro de 278 mm entre dos postes; los postes cuentan con un sistema de rosca y tuercas para colocar la viga de reacción entre los 440 mm y hasta los 880 mm de altura con respecto a la posición del plato, según las necesidades del ensaye. Se fija a la viga de reacción la celda de fuerza a su vez conectada con la columna de carga del consolidómetro, tal como se ilustra en el esquema de la fig. 2.3; éstos dos últimos elementos se describen en secciones posteriores.

La máquina de compresión fue diseñada específicamente para realizar pruebas triaxiales de suelos, aunque también se pueden realizar distintos tipos de pruebas a compresión y tensión sin rebasar la carga máxima; entre estas pruebas evidentemente se encuentra la de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD.

2.4.2 Consolidómetro de anillo fijo

El consolidómetro que se utiliza en el equipo prototipo VCD es del tipo anillo fijo hecho de acero inoxidable; aloja muestras con un área transversal de 49.776 cm² y altura de 2.684 cm. Básicamente se compone del anillo que aloja a la muestra de suelo, la base a la que se fija el anillo, el pedestal que soporta al conjunto, la camisa de lucita que forma un recipiente donde se vierte agua, la columna de carga y el cabezal o tapa de carga con la que se comprime el espécimen. En la fig. 2.5 se muestra un esquema y una fotografía del consolidómetro, en la que se señalan las partes citadas así como algunos accesorios.



- 1 Válvula y línea para saturación
- 2 Base del consolidómetro a la que se fija el anillo
- 3 Pedestal que soporta al consolidómetro y aloja al transductor de presión de poro
- 4 Anillo de tipo fijo
- 5 Empaques tipo arosellos y tornillos para unión de piezas
- 6 Columna de carga
- 7 Camisa de lucita
- 8 Cabezal o tapa de carga
- 9 Piedras porosas

Figura 2.5 Consolidómetro de anillo fijo para prototipo VCD

El diseño del odómetro, se hizo con la premisa de permitir el flujo de agua únicamente por la parte superior del anillo, de tal forma que en la base donde no existe drenaje, se generan presiones de poro que se registran durante el ensaye mediante el transductor de presión.

Las piezas del consolidómetro son desmontables y se unen mediante un sistema de tornillos y empaques del tipo arosellos, con lo que se asegura el sellado, sobre todo al tratarse de la unión entre el anillo y la base donde pudieran presentarse fugas de presión de agua durante el desarrollo del ensaye, con la consecuente carencia de registro de presión de poro.

La base a la que se fija el anillo, tiene en su interior un conducto de pequeño diámetro que se comunica por un extremo con una válvula de mínimo cambio volumétrico, la cual regula el paso de agua al sistema en el proceso de saturación e impide el drenaje por la base durante el ensaye (el conducto se debe saturar con agua desaerada para que el transductor de presión de poro registre adecuadamente durante el ensaye); el otro extremo del conducto, se comunica con una piedra porosa, la cual se aloja en el centro de la cara superior de la base. Además de filtrar las partículas sólidas de la muestra que pudieran pasar a la línea de saturación, la piedra permite comunicación entre la cara inferior de la muestra y el transductor de presión de poro, mismo que se enrosca en el centro y bajo la base, por lo que queda alojado dentro del pedestal. El pedestal es un cilindro hueco de acero que, además de alojar al transductor de presión de poro, eleva al conjunto para ajustarlo al nivel de la viga de reacción de la máquina de compresión; tiene un barreno en la parte inferior para permitir la salida de los cables del transductor de presión de poro. El anillo del consolidómetro cuenta con un empaque tipo arosello en todo el diámetro exterior, para embonar con una camisa de lucita, dentro de la cual se vierte agua para mantener inundada la muestra durante el ensaye.

El cabezal con el que se comprime el suelo se fija a la columna de carga del consolidómetro, la que a su vez se fija a la viga de reacción de la máquina de compresión (ver fig. 2.3); es de acero inoxidable con un diámetro 1 mm menor al del anillo; aloja una piedra porosa para permitir el flujo de agua a su través.

2.4.3 Transductor de presión de poro PDCR 810

El transductor de presión de poro es un dispositivo electrónico que se utiliza en la prueba de consolidación VCD para registrar la presión intersticial que se desarrolla en la base de la muestra; al conocerse ésta y el esfuerzo total (que se registra mediante la celda de fuerza), es posible conocer el esfuerzo efectivo medio en cualquier instante del ensaye, para lo que se emplea la ec. 1.20.

El transductor de presión se compone de un diafragma con un deformímetro eléctrico del tipo *strain gauge*, que se encuentran dentro de una pequeña cavidad de forma cilíndrica. En la fig. 2.6 se ilustra un esquema del transductor en el que se señalan las partes principales y sus dimensiones. A continuación se presentan las especificaciones generales del mismo:

Marca	DRUCK
Modelo	PDCR 810 General purpose
Capacidad	$\pm 690 \text{ kPa}$ ($\pm 7 \text{ kg/cm}^2$)
Alimentación	10 voltios de corriente directa

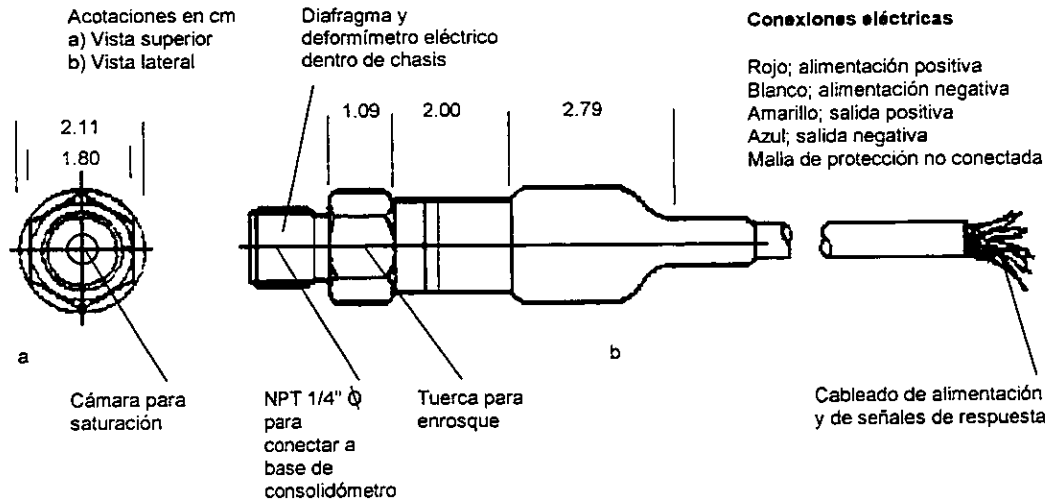


Figura 2.6 Esquema del transductor de presión de poro PDCR 810

El diafragma del transductor de presión, que se encuentra en un extremo del dispositivo (fig. 2.6), está hecho de silicón. En el mismo extremo donde se encuentra el diafragma, existe una pequeña cámara que debe saturarse con agua desaerada para tener un registro adecuado de la presión de poro. Tanto el diafragma como el deformímetro eléctrico se encuentran encapsulados en un cilindro metálico sellado y soldado eléctricamente.

El transductor de presión de poro se alimenta con 10 voltios de corriente directa mediante una fuente de poder, y responde con variaciones de señal para distintas condiciones de presión; de esta manera es posible obtener relaciones de variación de voltaje contra unidades ingenieriles de presión mediante calibraciones (capítulo 3). Las señales de voltaje se registran automáticamente mediante la tarjeta de conversión A/D instalada en la PC y los elementos de programación. Este transductor tiene la capacidad de registrar presiones negativas (presiones menores a la atmosférica), con lo que es posible conocer las subpresiones que frecuentemente se generan en el proceso de descarga del suelo.

2.4.4 Celda de fuerza TC-S

La celda de fuerza es un transductor con deformímetros eléctricos del tipo *strain gauge*, mediante la cual se conoce la fuerza con que reacciona el suelo durante el ensaye y por tanto el esfuerzo total. Tiene la forma característica de una "S" y está hecha de aluminio. En la fig. 2.7 se muestra un esquema de la celda de fuerza que se describe.

La celda cuenta con dos preparaciones de rosca en las partes superior e inferior para fijarse entre la viga de reacción de la máquina de compresión y la columna de carga del consolidómetro

(ver fig. 2.3); cuando la prueba está en desarrollo el suelo reacciona contra el cabezal, transmitiéndose la carga a la celda a través de la columna de carga.

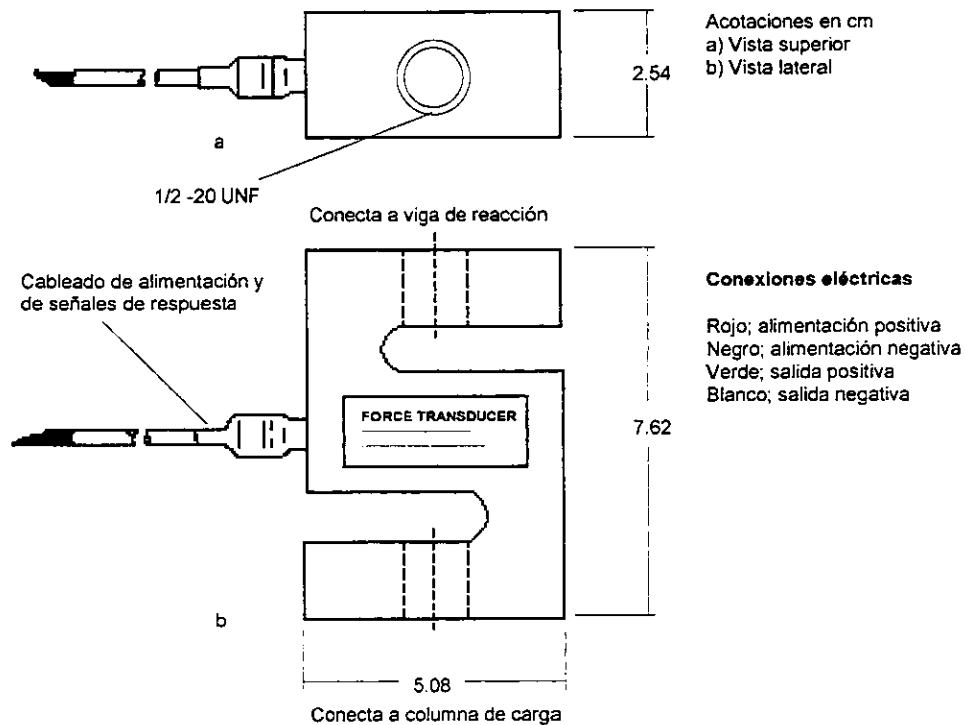


Figura 2.7 Esquema de la celda de fuerza TC-S

A continuación se listan las especificaciones generales de la celda de fuerza:

Marca	T-HYDRONICS, Incorporated
Modelo	TC-S
Capacidad	4.45 kN (454 kg, sobrecarga: 150% de su capacidad)
Mínima variación registrable	3.03 N (0.31 kg)
Alimentación	10 a 15 voltios
Histéresis	0.02% F.S.O

La celda de fuerza se alimenta con 10 voltios de corriente directa mediante una fuente de poder, y responde con variaciones de señal para distintas condiciones de fuerza, con lo que es posible obtener unidades ingenieriles mediante calibraciones (capítulo 3). Las señales analógicas que emite la celda, se registran automáticamente por medio de la tarjeta de conversión A/D y los elementos de programación.

Aunque durante los ensayos de consolidación únicamente se registran fuerzas de compresión, la celda de fuerza puede también trabajar a tensión; su capacidad permite llegar a esfuerzos de hasta 980 kPa (10 kg/cm²), suficiente para una prueba de consolidación.

2.4.5 Transductor de desplazamiento DC-DC 240

El transductor de desplazamiento, es un transformador diferencial lineal de alta precisión envuelto en un cilindro de acero inoxidable, dentro del cual corre axialmente una barra metálica. La barra genera diferentes voltajes de salida que son proporcionales a su posición; de esta forma es posible conocer la deformación que sufre la muestra en cualquier instante del ensaye VCD al relacionar cambios de voltaje con deformación mediante calibraciones (capítulo 3). En la fig. 2.8 se muestra un esquema del transductor atinente, así como un diagrama del circuito.

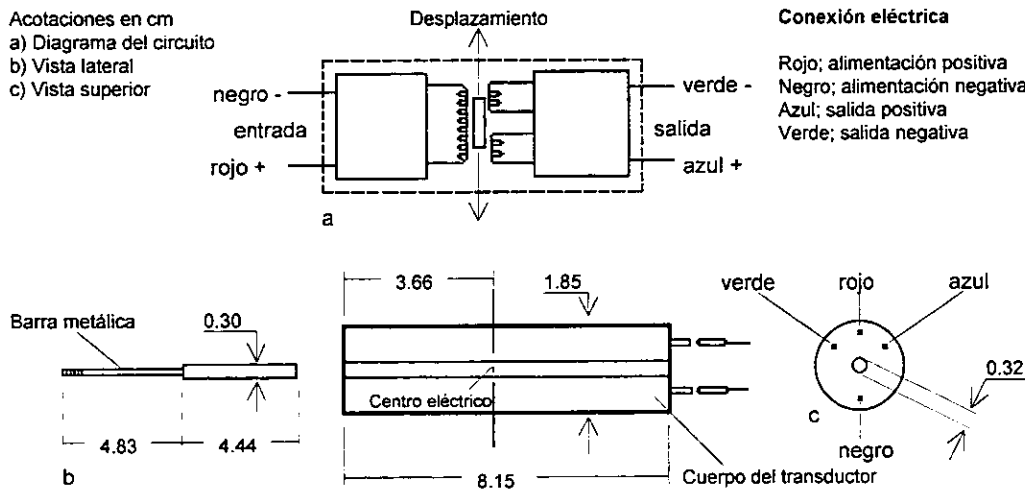


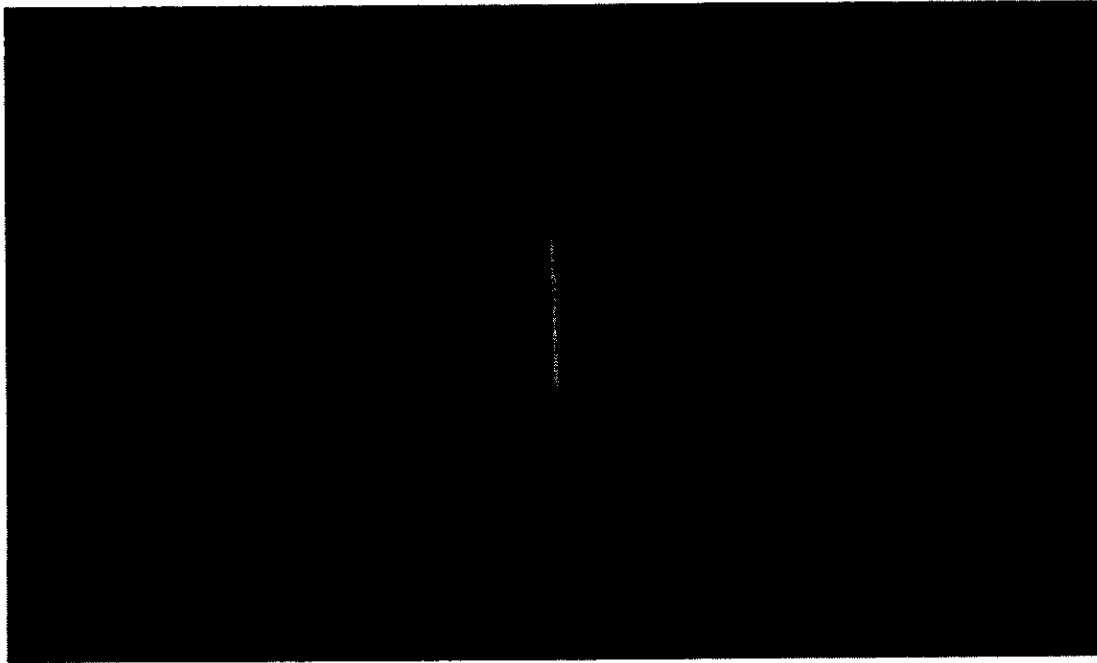
Figura 2.8 Esquema del transductor de desplazamiento DC-DC 240

El cuerpo del transductor se fija al consolidómetro, que se desplaza verticalmente durante el ensaye, permitiendo que la barra metálica libre se apoye sobre la columna de carga que permanece fija, de tal forma que se presenta un movimiento relativo del cuerpo del transductor con respecto a la barra, lo que se traduce precisamente en la deformación que experimenta la muestra. Deben utilizarse materiales no magnéticos para sostener el cuerpo del transductor, puesto que las señales de salida pueden contaminarse en caso contrario.

De la fig. 2.8, se observa que la barra metálica es independiente del cuerpo del transductor y corre libre por el centro de éste. La posición del centro eléctrico que se señala en el esquema es importante, debido a que este punto define la polaridad de las señales de salida, factor que se tomó en cuenta para la configuración del sistema de adquisición de datos.

Al igual que el transductor de presión y la celda de fuerza, el transductor de desplazamiento se alimenta con 10 voltios de corriente directa mediante la fuente de poder. Las señales de respuesta se registran mediante el sistema automático de adquisición de datos. A continuación se listan las especificaciones generales del transductor:

Marca	TRANS-TEK Incorporated
Modelo	Displacement Transducer DC-DC Series 240
Desplazamiento cubierto	12.7 mm
Mínima variación registrable	0.0014 mm
Alimentación	6 a 30 voltios



- 1 Transductor de presión de poro PDCR 810
- 2 Transductor de desplazamiento DC-DC 240
- 3 Celda de fuerza TC-S

Figura 2.9 Vista del transductor de presión, transductor de desplazamiento y celda de fuerza

2.5 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los avances en la tecnología de computadoras, en combinación con otro tipo de equipos digitales, han abierto el camino para desarrollar una extensa gama de sistemas automáticos de adquisición de datos que se utilizan en diversas aplicaciones; entre ellas, las pruebas de laboratorio de materiales. Las bondades principales de los sistemas automáticos de adquisición de datos son la precisión, la rapidez y la funcionalidad; gracias a ello, en los laboratorios de materiales se ven cada vez con mayor frecuencia pruebas tradicionales que se instrumentan, además de que se han creado pruebas con registro de nuevas variables que sin este tipo de equipos sería imposible medir.

El sistema automático de adquisición de datos para la prueba de consolidación con VCD, tiene como finalidad expresa la alimentación eléctrica y el acondicionamiento de señales analógicas del transductor de presión de poro, la celda de fuerza y el transductor de desplazamiento, así como la conversión de las señales de voltaje a registros digitales que puedan reducirse en una computadora. Para integrar el sistema de adquisición de datos del prototipo VCD, se adquirió y configuró un equipo conformado por una computadora personal, PC, un acondicionador de señales con fuente de poder y una tarjeta de conversión analógica-digital A/D. En los subincisos siguientes se describen cada uno de los equipos citados.

2.5.1 Acondicionador de señales con fuente de poder NI SCXI-1121

El transductor de presión de poro, la celda de fuerza y el transductor de desplazamiento que se utilizan en el prototipo VCD, necesitan alimentarse con voltaje de corriente directa para poder responder con señales de la misma naturaleza ante las acciones físicas que obran sobre ellos durante el ensayo de consolidación; de tal suerte que se ocupa de una fuente de poder que cumpla con las características de estabilidad y niveles de alimentación que requieren éstos dispositivos electrónicos. Aunado a lo anterior, las señales de respuesta del transductor de presión de poro y de la celda de fuerza, deben amplificarse para lograr una resolución acorde con la capacidad de la tarjeta de conversión A/D, además de que todas las señales se deben filtrar para evitar ruido electrónico que deteriore la calidad de los registros.

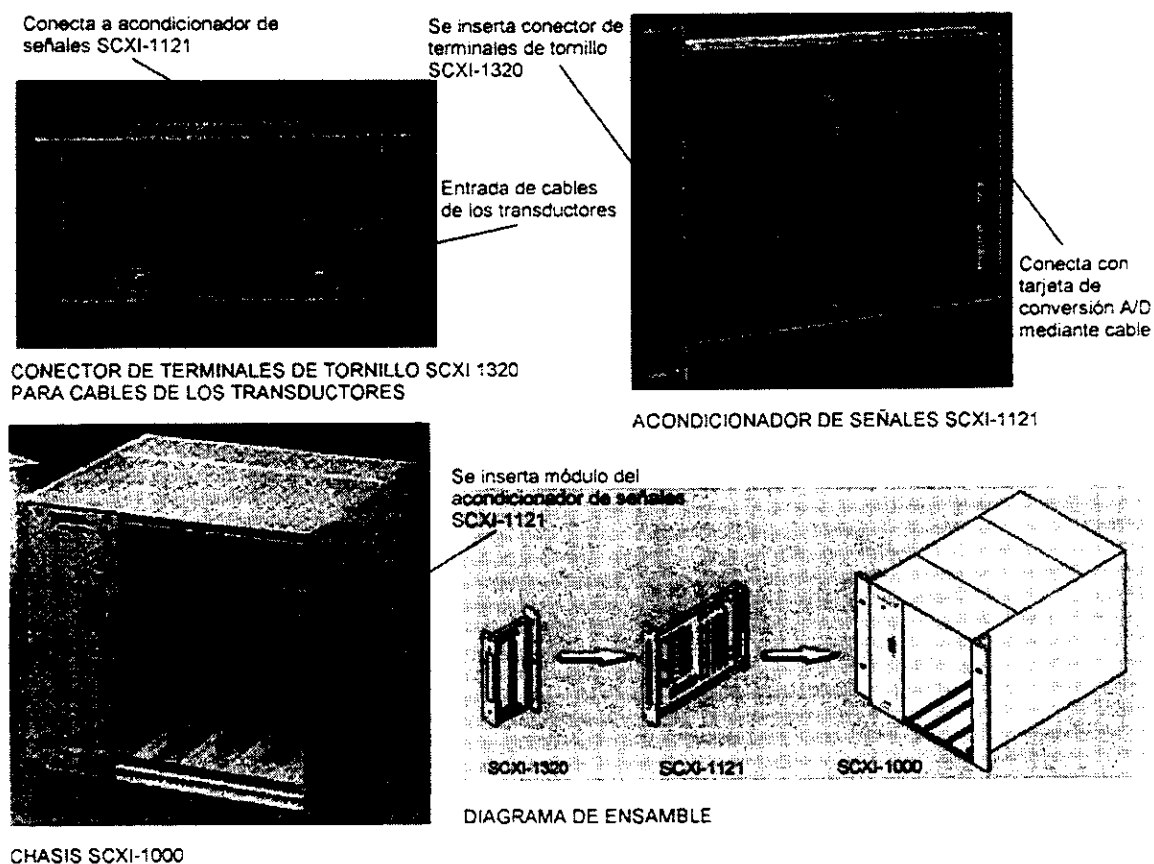


Figura 2.10 Vista del acondicionador de señales con fuente de poder y diagrama de ensamble

Así, se adquirió para el prototipo VCD un acondicionador de señales con fuente de poder integrada que cumple satisfactoriamente con las necesidades de alimentación, amplificación y filtrado de los tres registradores electrónicos; en lo sucesivo se hace referencia a este equipo como acondicionador de señales únicamente. En la fig. 2.10 se ilustran los componentes del acondicionador de señales así como un diagrama de ensamble. Enseguida se listan sus características:

Marca: National Instruments

Modelo SCXI-1121

4 canales de amplificación

4 canales de alimentación en modo corriente o voltaje

En modo voltaje la alimentación puede ser de 3.333 Voltios a 28 mA ó 10 Voltios a 14 mA

Ganancias por canal desde 1 hasta 2000

Filtro por canal de 4 Hz ó 10 Hz

El acondicionador de señales, se integra en tres módulos convenientemente dispuestos para facilitar la conexión de los cables de los transductores. Las líneas de alimentación y las de respuesta de cada transductor, se conectan al acondicionador de señales mediante un conector de terminales de tornillo (SCXI 1320, fig. 2.10), con lo que cada cable queda perfectamente aislado y asegurado en su posición.

El módulo del acondicionador de señales, se inserta en un chasis (SCXI-1000, fig. 2.10), el cual dispone las preparaciones para conexión con la tarjeta de conversión A/D. Es precisamente el chasis el que distribuye la corriente que se toma de la acometida eléctrica.

Debido a la versatilidad del equipo descrito, que puede utilizarse para diferentes aplicaciones de instrumentación, fue necesario configurarlo para las necesidades específicas de la prueba VCD. La configuración se realizó por medio de conexiones (*jumpers*) dentro del circuito del acondicionador así como vía programación, para lo cual se siguieron los manuales del usuario respectivos. Se practicaron diversas configuraciones en el sistema de adquisición completo hasta encontrar la óptima, tal como se describe en el capítulo 3.

Tabla 2.1 Configuración del acondicionador de señales con fuente de poder NI SCXI-1121

Canal	Transductor	Alimentación	Ganancia	Puente	Filtrado	Operación
0	Desplazamiento	10 V a 14 mA	1	Completo	4 Hz	En uso con tarjeta de A/D Lab-PC+ modo NRSE
1	Presión	10 V a 14 mA	200	Completo	4 Hz	
2	Carga	10 V a 14 mA	100	Completo	4 Hz	
3	Sin señal	-	-	-	-	

En la tabla 2.1 se resume la configuración actual de los canales del acondicionador de señales que se utilizan para el ensaye. En la configuración final se definió la asignación de canales para los transductores, la ganancia por canal que se refiere al número de veces que se desea amplificar la señal analógica del transductor, el modo y nivel de alimentación, el nivel de filtrado, tipo de puente y el modo de operación en combinación con el resto de los equipos digitales.

2.5.2 Tarjeta de conversión analógica-digital A/D NI Lab-PC+

La tarjeta de conversión analógica-digital A/D, básicamente se encarga de transformar las señales de voltaje de los transductores una vez que éstas se amplifican y filtran, en registros digitales que pueden procesarse con una computadora. Se compone de una serie de circuitos electrónicos integrados en una tarjeta que se instala en una PC. En la fig. 2.11 se ilustra una fotografía de la tarjeta A/D y un diagrama de ensamble en la PC.

Las compañías de instrumentación ofrecen una extensa variedad de tarjetas de conversión A/D, con gran capacidad de canales y velocidades altísimas de muestreo, que rebasan por mucho los requerimientos de la prueba de consolidación VCD, ya que por tratarse de una prueba muy lenta, las frecuencias de muestreo necesarias son muy bajas (una muestra por minuto por canal podría resultar incluso excesiva), además de que se necesitan únicamente tres canales de recepción para los tres transductores. Por lo anterior, se adquirió una tarjeta de conversión A/D de bajo costo con capacidad para 8 canales. A continuación se listan las especificaciones generales de la tarjeta de conversión A/D:

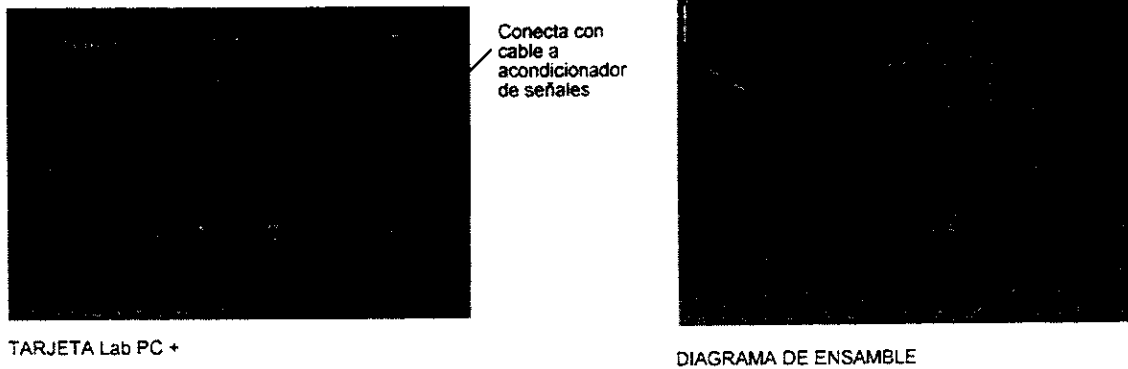


Figura 2.11 Tarjeta de conversión A/D Lab-PC+ y diagrama de ensamble en PC

Marca	National Instruments
Modelo	Lab PC+
Resolución	12 bit
Número de canales	8
Máxima capacidad de muestreo	83,000 muestras por segundo
Ganancias	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100
Intervalo de señales de entrada	-5 a 5 voltios

Antes de su instalación en la PC, la tarjeta se configuró por medio de conexiones (*jumper*s) en los circuitos, para lo que se tomó en cuenta el tipo de señal de los transductores, la configuración del acondicionador de señales y de la misma PC. La configuración de la tarjeta se realizó con estricto apego a los manuales del usuario respectivos, ya que una selección inadecuada pudiera resultar en daño parcial o total de la tarjeta. En la configuración se direccionó la tarjeta a la PC, se eligió la polaridad de las señales de entrada y el modo de operación. En la tabla 2.2 se resume la configuración final de la tarjeta.

Tabla 2.2 Configuración de la tarjeta de conversión analógica-digital A/D NI-Lab-PC+

Dirección a PC	Canal DMA	Línea de interrupción	Intervalo analógico de entrada-salida	Modo de operación
Hex 260	3	IRQ 5	Bipolar (± 5 Voltios)	NRSE (Non Referenced Single Ended)

2.6 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Durante la prueba de consolidación con deformación constante, VCD, el sistema de adquisición de datos del equipo prototipo, debe tomar periódicamente lecturas del transductor de presión de poro, de la celda de fuerza y del transductor de desplazamiento, para después, mediante una secuencia lógica de pasos, reducir los registros digitales a los parámetros de permeabilidad, consolidación y compresibilidad del suelo en estudio.

Mediante la programación, se puede gobernar la operación del sistema de adquisición de datos del prototipo VCD y específicamente a la tarjeta de conversión A/D, para la toma periódica de lecturas durante el ensaye, además de que se indica la forma en que se deben manejar los registros digitalizados hasta su reducción a los parámetros buscados.

En la actualidad, existe una extensa gama de plataformas de programación para controlar los sistemas de adquisición de datos; éstas van desde las simples hasta las más complejas con infinidad de funciones y herramientas que pueden utilizarse en múltiples aplicaciones. Para la programación de la adquisición de datos del equipo prototipo VCD, se utilizó una poderosa plataforma de programación de la compañía National Instruments que tiene por nombre NI-DAQ.

Con la plataforma NI-DAQ se pueden crear algoritmos para controlar la adquisición de datos de una tarjeta de conversión A/D, en los lenguajes Visual Basic, Professional Basic, Turbo C++, Borland C++, QuickBASIC, etc. Así mismo, NI-DAQ cuenta con un programa de adquisición de datos listo para ejecutarse llamado DAQWare, el cual tiene interfaces gráficas a manera de tableros de control para configurar, monitorear, grabar y controlar la adquisición de señales de la tarjeta de conversión A/D.

Así, se eligió el programa DAQWare para controlar el sistema de adquisición de datos del prototipo VCD, ya que además de tener la gran ventaja de ser un programa listo para ejecutarse, se adapta a las necesidades de la prueba que se estudia. Las funciones básicas del programa DAQWare para controlar la adquisición de datos de la prueba VCD, son las siguientes:

- Asignar a la tarjeta de conversión A/D los canales a monitorear
- Indicar la frecuencia de muestreo por canal
- Grabar los registros digitalizados de los transductores en la memoria de la PC y ordenarlos en un archivo de datos compatible con una hoja de cálculo

En la fig. 2.12 se ilustra un diagrama de flujo de la programación del sistema de adquisición de datos del prototipo VCD: una vez que se inicia el ensaye, los transductores de presión, fuerza y desplazamiento emiten señales de voltaje de acuerdo a las fuerzas actuantes. Las señales se amplifican y filtran por medio del acondicionador; posteriormente, la tarjeta de conversión analógica-digital A/D muestrea y transforma la señales analógicas de voltaje en registros digitales.

Mediante los algoritmos de programación se seleccionan los canales a monitorear, se indica la frecuencia de muestreo por canal y se almacenan los registros digitalizados en un archivo de estructura definida compatible con una hoja de cálculo. Al finalizar el ensayo, el archivo de datos se importa a una hoja de cálculo previamente programada, con lo que los registros se reducen para finalmente obtener un reporte completo de los parámetros de permeabilidad, consolidación y compresibilidad del suelo que se estudie, incluyendo las gráficas respectivas.

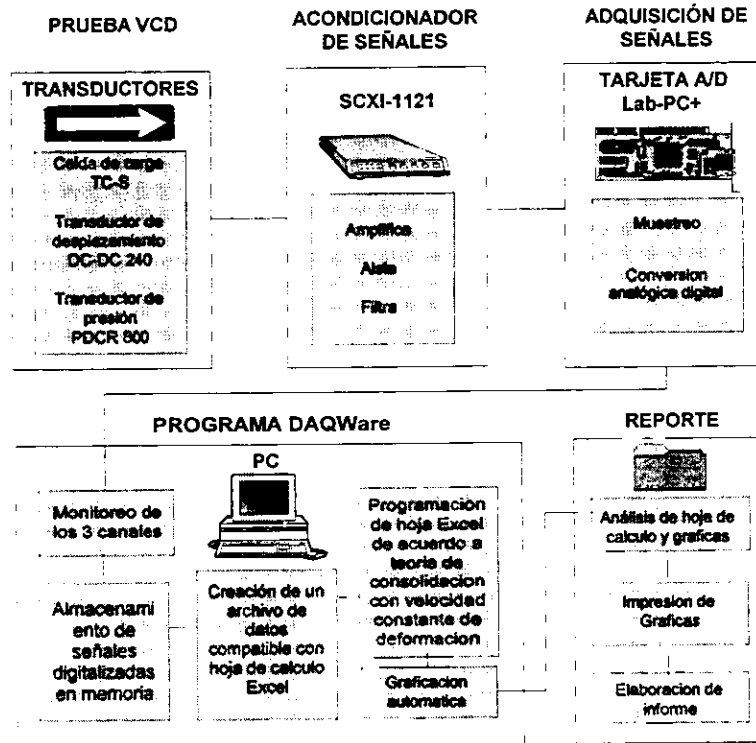


Figura 2.12 Diagrama de flujo de la programación del sistema de adquisición de datos. (Sistema abierto)

La plataforma de programación NI-DAQ, incluyendo el programa DAQWare, se instaló en la misma PC en la que se encuentra instalada la tarjeta A/D, bajo el ambiente de sistema operativo DOS 6.1. Durante la instalación del programa, se configuraron todos los equipos del sistema de adquisición y sus respectivos modos de operación (ver tablas 2.1 y 2.2), para lo que se siguieron las instrucciones de los manuales del usuario respectivos. En los incisos siguientes se explica la forma en que opera el programa DAQWare.

2.6.1 Operación del programa de adquisición de datos DAQWare

El programa DAQWare está hecho en el lenguaje Visual Basic; se diseñó específicamente para controlar equipos de adquisición de datos de la compañía National Instruments, aunque también puede operar con equipos de otras compañías. El programa se encarga de ordenarle a la tarjeta de conversión A/D los canales que debe monitorear, la frecuencia con que debe hacerlo, dónde se debe guardar el archivo de datos y hacerlo compatible con una hoja de cálculo. Así

mismo, permite el monitoreo vía pantalla PC de los canales que se muestran. El programa cuenta con interfaces gráficas a manera de tableros de control para configurar las distintas funciones.

Una vez que se instala el DAQWare en la PC, puede utilizarse si se ejecuta el archivo `daqware.exe` del subdirectorio DAQWARE en el directorio NI-DAQ, tecleando `daqware`; el programa despliega entonces un menú principal con las siguientes funciones:

- Configure
- Utilities
- Instruments
- Help
- Quit

Cada vez que se ejecute el DAQWare para la adquisición de datos de la prueba VCD, se debe indicar al programa el modo en que se configuró el acondicionador de señales y la tarjeta de conversión A/D (tablas 2.1 y 2.2); para ello sirve la función *Configure* del menú principal, en la que se deben elegir las opciones *nonreferenced single-ended* y *bipolar* para *Analog Input Configuration*; de esta forma, el programa puede reconocer los voltajes de respuesta de los transductores en el intervalo de -5 a 5 Voltios. Las opciones restantes de la función *Configure* se deben dejar tal como vienen por asignación.

Utilities del menú principal de DAQWare, muestra una serie de tableros en la pantalla con los que se pueden realizar pruebas preliminares de adquisición con la tarjeta de conversión A/D, antes de que inicie la adquisición formal del ensaye. Con la opción *Analog Input* de *Utilities*, se pueden monitorear los valores digitales de voltaje de todos los canales de la tarjeta A/D, ya sea en modo binario o directamente en voltaje; esta función es muy útil antes de iniciar el ensaye de consolidación, pues permite verificar que el sistema reconoce correctamente las señales que emiten los transductores. Las opciones restantes de *Utilities* no son de interés para la prueba y deben dejarse tal como vienen por asignación.

La adquisición formal de datos durante el ensaye, se realiza mediante la función *Instruments* del menú principal de DAQWare. Al elegir la opción *Strip Chart and Data Logger*, el programa despliega una pantalla de monitoreo y debajo de ella un tablero de control, tal como se ilustra en la fig. 2.13. En el inciso siguiente se presenta una amplia explicación de la forma en que opera el tablero de control.

Finalmente se encuentran dentro del menú principal del DAQWare, las funciones de ayuda en línea, *Help*, y de salida del programa, *Quit*.

2.6.2 Operación del tablero de control del programa de adquisición de datos DAQWare

En la fig. 2.13 se muestra la pantalla de monitoreo y el tablero de control para la adquisición de datos durante el ensaye, la cual se despliega con la opción *Strip Chart and Data Logger* de la función *Instruments* del menú principal del programa DAQWare, según se explica arriba. En la citada figura, se señalan los controles e interruptores principales, y se indica la función de cada uno en forma sucinta.

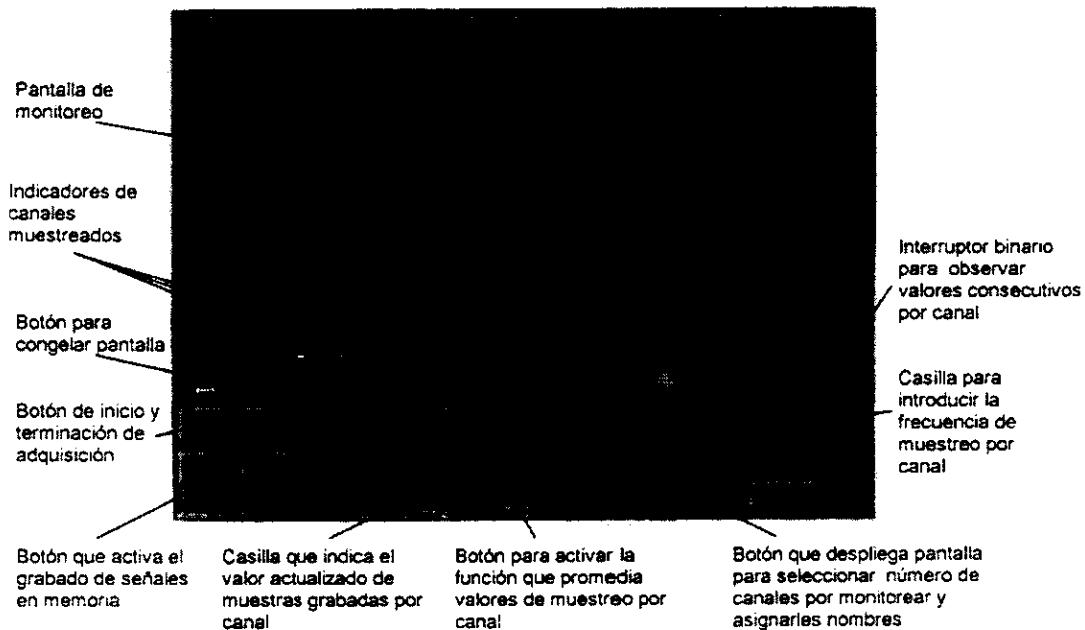


Figura 2.13 Pantalla de monitoreo y tablero de control del programa de adquisición de datos DAQWare

Para iniciar la adquisición de datos del ensaye VCD, deben elegirse inicialmente las condiciones con las que se desea realizar la adquisición, tal como se indica en lo que sigue: al oprimir el botón **Channel Setup**, se despliega una nueva pantalla en la que se deben indicar los canales de la tarjeta que se desean monitorear y ofrece la opción de asignar nombres de hasta 14 caracteres a los canales que se seleccionen; para el caso del ensaye VCD, se deben seleccionar los canales 0,1 y 2 asignándoles los títulos Deformación, Presión u_b y Fuerza, respectivamente.

Al oprimir el botón **Average**, se activa la función que promedia el valor de un número determinado de lecturas o muestras por canal y lo graba en el archivo de datos, es decir que únicamente se almacenan en memoria valores medios de cierto número de muestras que se registren por canal en un tiempo determinado; en esta casilla debe introducirse el valor 20 para que el programa únicamente grabe en memoria el valor medio de cada 20 lecturas por canal, aunque es posible promediar desde 2 hasta 50 lecturas.

En la casilla **Sample Rate**, se introduce el valor de la frecuencia de muestreo en muestras por segundo; en esta casilla debe introducirse el valor 1, es decir que se tomará una lectura por segundo. Los parámetros de frecuencia de muestreo, **Sample Rate**, y promedio, **Average**, son muy importantes ya que gobiernan el arreglo del archivo de datos, tal como se explica en el subinciso 2.6.3 de este capítulo.

Una vez que se tiene la muestra debidamente montada en el aparato de prueba y después de haber configurado e introducido los parámetros de promedio y frecuencia al programa DAQWare, según se indica en los párrafos anteriores, se puede iniciar la adquisición de datos si se oprime el botón **Start/Stop** del tablero de control (ver fig. 2.13), a la vez que se activa la máquina de compresión para dar inicio al ensaye. En la pantalla de monitoreo se grafican las variaciones de

voltaje de los canales seleccionados (de los transductores) en tiempo real, distinguiéndose un color particular para cada uno de ellos.

Antes de oprimir el botón **Start/Stop** para iniciar la adquisición y monitoreo, debe colocarse el interruptor binario **Consecutive/Most recent** en la posición **Consecutive** y debe presionarse el botón **Save**. Al activar este último, se le indica al programa que guarde los registros digitalizados de los transductores en el archivo temporal \$BINDAT\$.DAT, conforme éstos se van adquiriendo; el archivo de datos se encuentra en el mismo subdirectorío donde reside el archivo daqware.exe. En la casilla **File Size** se despliega el número actualizado de muestras por canal grabadas en el archivo de datos.

Si se oprime el botón **Pause**, se activa la función que congela la pantalla de monitoreo para observar detenidamente algún valor actual de las gráficas de voltaje, sin que esta acción interrumpa la adquisición y el almacenamiento de datos.

Al colocar el interruptor binario **Consecutive/Most recent**, en cualesquiera de las dos posiciones, se pueden observar en la pantalla de monitoreo los valores de voltaje por canal en forma consecutiva o los últimos muestreados respectivamente. Es recomendable monitorear los valores de voltaje por canal en forma consecutiva para observar el comportamiento de los transductores de presión de poro, fuerza y desplazamiento durante el ensaye.

Una vez que se quiera finalizar la adquisición de datos, se debe oprimir nuevamente el botón **Start/Stop**; el programa despliega entonces una pantalla en la que se eligen el formato de conversión del archivo de datos \$BINDAT\$.DAT y el nombre del nuevo archivo. Se debe elegir el formato de conversión Lotus 1-2-3 para hacerlo compatible con una hoja de cálculo y se le debe asignar un nombre representativo al ensaye; también es conveniente escribir algún comentario de identificación para lo cual se dispone de una casilla en la que se pueden teclear algunas frases. Al finalizar la conversión del archivo de datos, se graba automáticamente con el nombre que el usuario le haya designado y el archivo temporal se elimina.

2.6.3 Arreglo e interpretación del archivo de datos

Al finalizar el ensaye y por tanto la adquisición de datos, el archivo de datos con formato Lotus 1-2-3 se aloja en el subdirectorío DAQWARE con el nombre que el usuario haya designado, según se explica en el subinciso anterior. En la fig. 2.14 se muestra un segmento de un archivo de datos de un ensaye real de consolidación con velocidad de deformación constante (capítulo 4); obsérvense los enunciados del encabezado con información importante para la identificación e interpretación del ensaye, también debe destacarse que se alinean tres columnas de datos que corresponden precisamente a los valores digitalizados de voltaje por canal que se registraron durante la prueba.

La disposición del archivo es de la siguiente manera: las primeras 10 líneas corresponden al encabezado en el que se incluyen datos del nombre del programa de adquisición y la versión, el número de líneas del encabezado, el texto del comentario opcional escrito al finalizar la adquisición, la fecha y hora de comienzo del ensaye, la frecuencia de muestreo de los canales, el número de formato de conversión (2 para Lotus 1-2-3; este formato es también compatible con hoja de cálculo Excel), el número de muestras o registros almacenadas por canal y el número de canales muestreados.

Inmediatamente bajo el encabezado se despliegan 3 columnas, a cada una le corresponde el nombre de un canal, en el siguiente renglón bajo los títulos de cada canal, se indica el número de canal (2, 1, 0) y bajo éste la ganancia de la tarjeta. Bajo la columna de cada canal se despliegan los datos digitalizados de voltaje que se registraron durante el ensayo, mismos que se extienden en tantos renglones como muestras por canal se hayan almacenado.

Encabezado del archivo de datos	DAQWare File Version: 1.6 Number of Lines in Header: 10 Comment: Suelo lacustre mexicali, carga Date: 08-27-1996 Time: 07:45:34 Sample Rate: 0.25 Scan Rate: 0.0 File Format: 2 Samples per Channel: 417.0 Number of Channels: 3
Nombre de los canales	Fuerza Presion ub Deformacion
Número de los canales	2 1 0
Ganancia de tarjeta por canal	1 1 1
Datos registrados de voltaje por canal ordenado en minutos por renglón	-0.435 0.020 4.001 -0.437 0.020 3.994 -0.439 0.020 3.989 -0.442 0.020 3.982 -0.442 0.020 3.975 -0.444 0.020 3.970 -0.444 0.020 3.962 -0.444 0.020 3.955 -0.449 0.020 3.948 -0.449 0.017 3.943 -0.452 0.020 3.936 -0.452 0.020 3.928
Continúa archivo...	

Figura 2.14 Segmento inicial de archivo de datos de un ensayo de consolidación con VCD (Limo de Mexicali, BCN; capítulo 4)

Cada registro de voltaje, corresponde al valor medio de las muestras captadas por canal en un lapso determinado; el tiempo que corresponde a cada renglón de valores se rige por los parámetros de frecuencia de muestreo y promedio que se introducen en las casillas del tablero de control **Sample Rate** y **Average** respectivamente antes de iniciar la adquisición, como se explicó en el subinciso anterior. Para los ensayos de consolidación que se presentan en el capítulo 4, se eligió una frecuencia de muestreo (Sample Rate) igual a 1, es decir, una muestra por segundo y el promedio (Average) de 20 muestras, según se indicó; esto quiere decir que la tarjeta toma 60 muestras por minuto, correspondiendo 20 a cada canal y el programa registra en el archivo de datos únicamente el valor medio de cada 20 muestras por canal, con lo que finalmente se obtiene un valor de voltaje de cada transductor cada minuto. Si se desea un arreglo distinto, se pueden variar los parámetros de frecuencia de muestreo y promedio para lograr, por ejemplo, el registro de una muestra por canal cada dos minutos, o tres, o bien cualquier otra frecuencia de muestreo. Sean

cuales fueren los valores de los parámetros de frecuencia y promedio, el efecto de su combinación debe conocerse para interpretar adecuadamente el archivo de datos.

2.6.4 Descripción de la hoja de cálculo

Una vez que finaliza el ensaye VCD, el archivo de datos se importa a una hoja de cálculo previamente programada para reducir los registros de voltaje a los parámetros de compresibilidad, consolidación y permeabilidad del suelo que se ensayó; la programación de la hoja de cálculos se realizó en Microsoft Excel, para lo que se consideró el arreglo del archivo como el que se muestra en la fig. 2.14. En la fig. 2.15 se presenta un segmento de la hoja de cálculo, misma que se divide en cuatro aspectos fundamentales a saber:

- Introducción de propiedades del suelo, dimensiones de la muestra y velocidad de ensaye
- Calibración de los valores de voltaje del archivo de datos a unidades de presión de poro, fuerza y deformación
- Cálculo de los parámetros de compresibilidad y permeabilidad de acuerdo con las ecs. 1.9, 1.20, 1.21 y 1.23 del capítulo 1
- Graficación automática de los parámetros del suelo calculados

La información que se debe introducir a la hoja de cálculo es la velocidad constante de deformación, R , con que se ensayó la muestra, en mm/min, el valor del parámetro b/r (capítulo 1), la densidad de sólidos, el contenido natural de agua en porcentaje, el área en cm^2 y la altura inicial de la muestra en cm (estas dos últimas tiene valores fijos).

La conversión de los valores de voltaje a unidades ingenieriles, se calcula con base en los factores que se obtuvieron en las calibraciones de los transductores (capítulo 3), además de que se consideran las ganancias del amplificador de señales que se asignaron a cada canal según se describe en incisos anteriores (tabla 2.1). Al conocerse las unidades ingenieriles de presión de poro, fuerza y deformación en la muestra a cada minuto, se calculan los valores de esfuerzo total, p , esfuerzo efectivo medio, $\bar{\sigma}$, relación de vacíos media, \bar{e} , permeabilidad, k , coeficiente de consolidación, c_v , deformación unitaria, ε , y finalmente la relación entre la presión de poro en la base y el esfuerzo total, u_b/p . Así mismo, se programó la hoja de cálculo para graficar automáticamente los parámetros calculados.

Obsérvese de la fig. 2.15 que el encabezado del archivo de datos se aloja en la columna A de los renglones 1 al 10; abajo de éste en las columnas A, B y C se encuentran los títulos Fuerza, Presión u_b y Deformación de los canales 2, 1, y 0 con la ganancia de la tarjeta y los valores digitalizados de voltaje que se extienden tantos renglones como valores por canal se hayan grabado. En la columna G de los renglones 1 al 9, se encuentran las casillas con las dimensiones iniciales de la muestra y los espacios para ingresar las variables de velocidad de ensaye y datos del suelo.

Los valores consecutivos de tiempo en minutos se despliegan en la columna D, correspondiendo el primer valor al minuto 0 después al 1, 2, 3, etc. En las columnas E, F y G se realiza el cálculo para escalar los valores de voltaje de los canales 2, 1 y 0 a unidades de fuerza en kg, presión de poro en kg/cm^2 y deformación en mm. En las columnas H e I, se calcula el esfuerzo total, p , y el esfuerzo efectivo medio, $\bar{\sigma}$, respectivamente para cada minuto en kg/cm^2 ; el esfuerzo

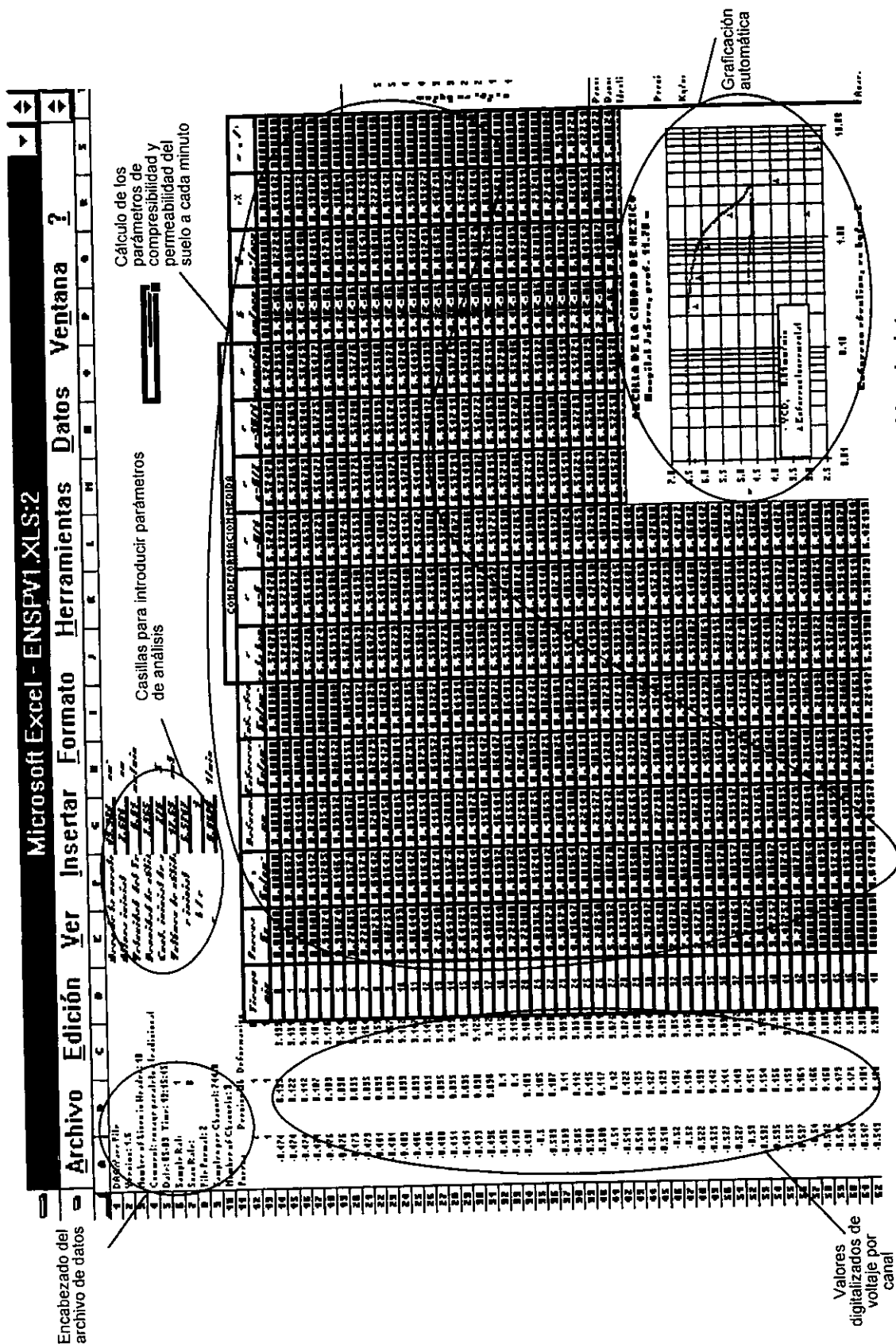


Figura 2.15 Segmento de hoja de cálculo para reducir el archivo de datos

total se obtiene al dividir los valores de fuerza de la columna E entre el área transversal de la muestra, el esfuerzo efectivo medio se calcula con la ec. 1.20 (capítulo 1) en la que obviamente intervienen los valores de presión de poro, u_b , que se encuentran registrados en la columna F.

De las columnas J a la N, se calcula la relación de vacíos a 5 profundidades de la muestra, el promedio de éstas se registra en la columna O; la relación de vacíos se obtiene mediante la ec. 1.9 del capítulo 1, en la que intervienen la densidad de sólidos, el contenido natural de agua, el parámetro b/r y las deformaciones registradas en la columna G. En la columna P se calculan los valores de permeabilidad, k , en cm/s, de acuerdo con la ec. 1.21 del capítulo 1, en la que intervienen las deformaciones de la columna G, el parámetro b/r , los valores actualizados de presión de poro en la base que se encuentran en la columna F y los valores medios actualizados de la relación de vacíos de la columna O. En la columna Q se calcula el coeficiente de consolidación, c_v , en cm²/s, para cada minuto de acuerdo con la ec. 1.23 del capítulo 1; finalmente en las columnas R y S se calculan la deformación unitaria, ϵ , y la relación entre la presión de poro en la base y el esfuerzo total, u_b/p .

Así mismo, se programó la hoja de cálculo para que automáticamente se tengan gráficas de la curva de compresibilidad, del coeficiente de consolidación contra el esfuerzo efectivo medio, del coeficiente de permeabilidad contra la relación de vacíos media y de la deformación unitaria contra la relación entre presión de poro en la base y esfuerzo total. En la esquina inferior derecha de la fig. 2.15, se ilustra la gráfica de compresibilidad obtenida para ese ensaye.

2.7 COSTO DEL EQUIPO PROTOTIPO VCD Y COMPARATIVA CON DOS EQUIPOS VCD INTEGRALES EXISTENTES EN EL MERCADO

Adquirir equipo para realizar pruebas de consolidación con VCD representa, sin duda, un gasto considerable para los laboratorios de Mecánica de Suelos; sin embargo, las ventajas que se obtienen en rapidez y producción de ensayos pueden amortizar rápidamente el costo inicial, por lo que la compra de un equipo VCD, puede representar en realidad una valiosa inversión.

En los incisos siguientes, se presenta una tabla del costo del equipo prototipo VCD desglosado por componentes; así mismo se compara el costo del prototipo VCD contra el de dos equipos integrales VCD existentes en el mercado. Lo anterior con la finalidad de ofrecer un panorama de alternativas para la compra de equipos VCD, donde por una parte se pueden adquirir los componentes por separado y conjuntarlos, tal como se hizo con el prototipo; y por otro lado, se puede adquirir el producto integral con compañías especializadas en equipos de laboratorio, ambas opciones con ventajas y desventajas que deben analizarse para cada caso particular.

2.7.1 Costo del consolidómetro prototipo VCD

Cuando se concibió el proyecto del consolidómetro prototipo VCD para el Laboratorio de Dinámica de Suelos de CENAPRED, se realizaron cotizaciones de los diferentes dispositivos que integran el equipo; al final de este proceso, se compraron los componentes con aquellas compañías que resultaron la mejor opción en costo, garantía y servicio.

En la tabla 2.3 se presenta el costo de cada componente del prototipo, la marca o compañía fabricante y la fecha de adquisición. La razón de presentar el costo en dólares, obedece al hecho de que todos los componentes, a excepción del consolidómetro de anillo fijo, son importados. Cabe destacar que las compañías, marcas y modelos que se indican en la tabla 2.3 no son únicas, sino que existe una gran variedad de proveedores y productos que pueden garantizar resultados similares de operación.

Tabla 2.3 Costo del equipo prototipo VCD

NOMBRE	FECHA DE ADQUISICIÓN	COMPAÑÍA	COSTO, EN DÓLARES (EUA)	COSTO POR TRASLADO, EN DÓLARES (EUA)	COSTO TOTAL, EN DÓLARES (EUA)
Máquina de compresión WF10026 TRITECH 10	SEP 94	WYKEHAM FARRANCE	2235	485	2720
Consolidómetro de anillo fijo acero inoxidable	DIC 94	Diseño Geo-Mecánico	580	-	580
Transductor de presión de poro PDCR 810	JUN 94	DRUCK	395	-	395
Celda de fuerza compresión tensión TC-S	JUN 94	T-HYDRONICS Incorporated	250	-	250
Transductor de desplazamiento DC-DC 240	JUN 94	TRANS-TEK Incorporated	246	25	271
Acondicionador de señales con fuente de poder NI SCXI-1121	SEP 94	National Instruments	1095	135 (incluye el traslado de todos los equipos NI)	1095
Chasis para acondicionador NI SCXI-1000	SEP 94	National Instruments	765		765
Terminal de conectores para transductores SCXI-1320	SEP 94	National Instruments	165		165
Cable conector SCXI-1341	SEP 94	National Instruments	105		105
Tarjeta de conversión A/D Lab-PC+	SEP 94	National Instruments	765		900
TOTAL					7246

Como se deduce de la tabla 2.3, la máquina de compresión es el elemento más caro y representa aproximadamente el 40% del costo total del equipo; sin embargo debe considerarse que es un equipo versátil con el que se pueden realizar pruebas a tensión o compresión en diversos materiales, incluso se pueden realizar pruebas triaxiales en suelos si se realizan algunas simples adaptaciones. Por otra parte, los componentes del sistema automático de adquisición de datos son igualmente versátiles y pueden utilizarse para múltiples aplicaciones de automatización.

2.7.2 Costo de dos equipos VCD integrales existentes en el mercado

En la Exposeotécnica que se realizó durante la XVIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos en Morelia, Michoacán (noviembre de 1996), se exhibió un equipo integral de la compañía Brainard Kilman para realizar pruebas de consolidación con VCD, así como para realizar pruebas triaxiales de suelos. En la fig. 2.16 se aprecia una vista del equipo integral referido.

El equipo integral, es muy similar al prototipo que se describe en este capítulo en cuanto a aspecto y funcionamiento. Dos son las diferencias básicas entre ambos equipos: el Brainard Kilman cuenta con un sistema para saturar la muestra mediante la aplicación de contrapresión, para lo cual dispone de una cámara triaxial y algunos accesorios; la segunda diferencia importante es el costo, que en el equipo Brainard Kilman resulta de 21,000 dólares (según cotización de enero de 1997), lo que representa más del 250% del costo total del prototipo VCD; si además se considera que el equipo Brainard Kilman no incluye el sistema automático de adquisición de datos, la diferencia en costo crece aún más.

Si bien la diferencia en costo del equipo integral BK comparada con la del equipo prototipo parece excesiva, se debe considerar que con el BK se pueden realizar también pruebas triaxiales.

Recientemente, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, adquirió un equipo integral de la compañía Geotest, para realizar pruebas de consolidación con gradiente controlado así como pruebas de consolidación con VCD. Al igual que el equipo BK que se describe en el párrafo anterior, este equipo integral cuenta con un

sistema para saturar la muestra mediante la aplicación de contrapresión.

El aspecto del Geotest es muy distinto al del prototipo aunque el principio de trabajo es esencialmente el mismo. El costo del equipo Geotest es de 8,000 dólares (según cotización de enero de 1997), que es prácticamente igual al costo del prototipo VCD, con la salvedad de que el equipo Geotest no incluye el sistema automático de adquisición de datos.

Si bien el costo del Geotest es más elevado que el del prototipo, tiene la ventaja de ser un equipo más versátil, pues se pueden realizar varios tipos de pruebas de consolidación, según se deduce de lo anterior.

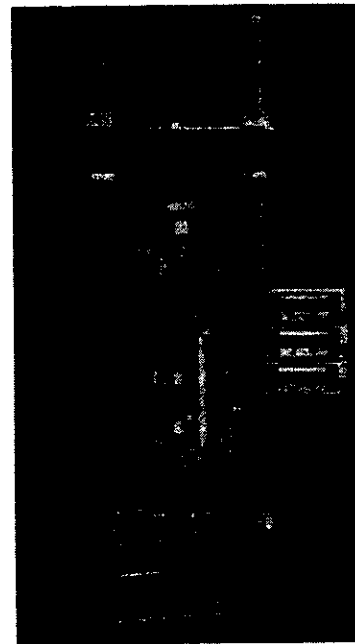


Figura 2.16 Equipo integral VCD de la compañía Brainard Kilman

2.8 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS EQUIPOS PARA REALIZAR PRUEBAS DE CONSOLIDACIÓN CON VCD

2.8.1 Consolidómetro VCD de Carl B. Crawford

Hamilton y Crawford (1959), fueron los primeros en realizar ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, aunque sin registrar la presión de poro en la base de la muestra. Posteriormente el mismo Crawford (1964) realizó una serie de tres ensayos VCD con medición de presión de poro, en la que comparó sus curvas de compresibilidad con las obtenidas mediante la técnica convencional de esfuerzo controlado incremental, ECI.

El equipo VCD que Crawford (1964) desarrolló, consistía en un consolidómetro de anillo fijo hecho de acero inoxidable para alojar muestras de 20 cm² de área y 2 cm de altura, el drenaje se permitió únicamente por la parte superior del espécimen. La base a la que se fijó y selló el anillo, tenía una piedra porosa de 1.27 cm de diámetro y estaba en comunicación con un transductor de presión de poro para medir la presión del agua intersticial en la base de la muestra. El consolidómetro se montó sobre un marco de carga, el cual deformó la muestra con velocidad constante igual a 0.023 mm/min; un anillo de carga indicó la fuerza de reacción del suelo y un micrómetro hizo lo propio con la deformación. Las lecturas del transductor de presión de poro se realizaron manualmente, para lo que se utilizó un dispositivo de cambio volumétrico nulo (Norwegian null-indicator device); las lecturas de fuerza y deformación se realizaron también en forma manual. Crawford (1964), señala que la velocidad de deformación constante de sus ensayos no lo fue estrictamente, debido a la deformación propia del anillo de carga. Quizás haya sido este aparato de prueba el primero en la historia con el que se realizaron ensayos VCD, incluyendo la medición de presión de poro en la base.

2.8.2 Consolidómetro VCD de Ronald E. Smith y Harvey E. Wahls

Smith y Wahls (1969), fueron los pioneros en la justificación de la prueba VCD como un método rápido y eficaz para realizar pruebas de consolidación. Ambos autores propusieron una teoría simple con la que además de la curva de compresibilidad, se valuó por vez primera el coeficiente de permeabilidad y el coeficiente de consolidación en un ensayo de este tipo.

En la fig. 2.17 se muestra el esquema del equipo que utilizaron Smith y Wahls (1969) para realizar los ensayos VCD; este consolidómetro se desarrolló en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Carolina del Norte, en la Unión Americana; consistía de un anillo fijo para alojar muestras de 2.54 cm de altura (no se menciona en la referencia el área transversal o diámetro), el flujo de agua se permitió únicamente por la parte superior de la muestra; la base a la que se fijó y selló el anillo, se conectó con una piedra porosa y con un transductor de presión de poro con capacidad de 34.5 kPa ó 689.5 kPa (0.35 kg/cm² ó 7.03 kg/cm²; según la permeabilidad del suelo y la velocidad de ensayo se utilizó uno u otro transductor de presión de poro) el cual registró la presión del agua intersticial en la base del espécimen. El conjunto se colocó sobre una prensa con velocidad de deformación constante; una celda de fuerza con capacidad de 2.2 kN (226.8 kg) se dispuso en la parte inferior para registrar la carga total aplicada; finalmente un micrómetro se utilizó para el registro de las deformaciones del suelo. Se realizaron lecturas periódicas de las variables medidas en forma manual.

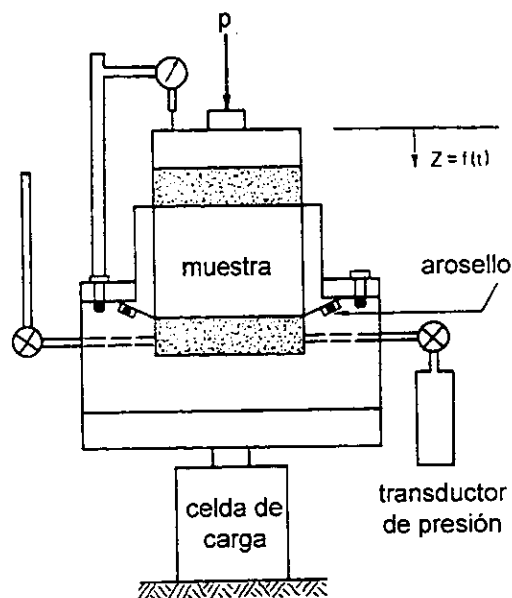


Figura 2.17 Consolidómetro VCD (Smith y Wahls, 1969)

2.8.3 Consolidómetro VCD del Instituto Geotécnico Sueco

A principios de los años setenta, se desarrollaron en Suecia los primeros equipos para efectuar pruebas de consolidación con velocidad constante de deformación; en ese entonces se elaboraron principalmente con fines de investigación. Sällfors (1975), realizó un gran estudio en la Universidad de Chalmers en Gotemburgo, Suecia, en el que comparó la carga de preconsolidación obtenida con diferentes procedimientos, entre ellos el de la prueba VCD. Desde 1975 el Instituto Geotécnico Sueco reglamentó el uso de la prueba VCD (Larsson, 1981) y a principios de los años ochenta se hizo una práctica común entre las firmas de consultoría suecas.

En la fig. 2.18 se ilustra un esquema del equipo referido; se trata de un consolidómetro de anillo fijo para especímenes de 50 mm de diámetro y 20 mm de altura; el consolidómetro se coloca sobre un marco de carga que comprime con velocidad de deformación constante a la muestra; se permite que el suelo drene por la cara superior mientras que la inferior se sella a una base para medir la presión del agua intersticial mediante un transductor de presión de poro. Una celda de fuerza en la parte superior y un transductor de desplazamiento apoyado sobre el pistón que comprime al suelo, registran continuamente la carga total aplicada y la deformación experimentada. Las lecturas de las tres variables que se miden durante los ensayos se realizan en forma automática mediante un sistema de adquisición de datos. Obsérvese que el principio de operación del equipo VCD sueco, es muy similar al prototipo VCD que se describe en este capítulo.

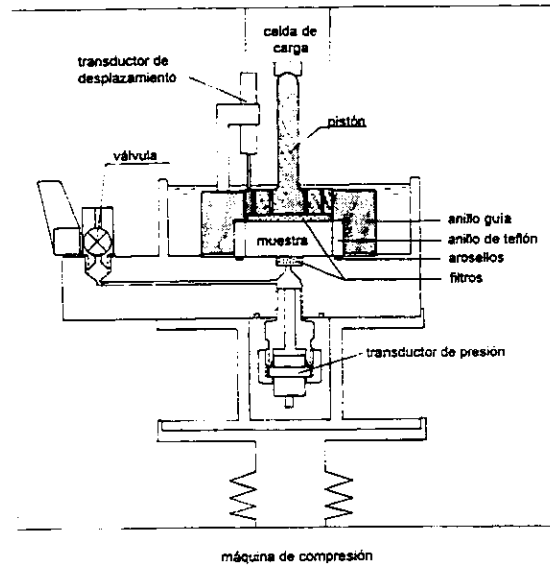


Figura 2.18 Consolidómetro VCD del Instituto Geotécnico Sueco (Larsson, 1981)

2.8.4 Participaciones mexicanas

El Profesor Bill Houston, entonces de la Universidad de Berkeley, California, realizó durante 1973 su estancia sabática en el Instituto de Ingeniería de la UNAM; entre otros proyectos, trabajó conjuntamente con el Ingeniero Luis Montañez en la construcción de un consolidómetro VCD; sin embargo, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios y no se realizó informe o reporte escrito alguno.

Con motivo de una investigación sobre el mejoramiento de la compresibilidad de rellenos hidráulicos efectuada en el Instituto Geotécnico Sueco en Linköping, Suecia, Mendoza y Hartlén (1985) diseñaron un consolidómetro para realizar pruebas VCD. Debido a las condiciones del fenómeno en estudio (se probaron mezclas de bolas de arcilla con lodo con diferentes contenidos de agua), se construyó un anillo de dimensiones excepcionalmente grandes (300 mm en diámetro y altura) hecho de polipropileno. En la fig. 2.19 se ilustra una vista del equipo VCD referido, al que los autores bautizaron como consolidómetro SMEX (Suecia-México).

El anillo permaneció fijo y sellado a una base metálica de manera que se permitió el drenaje únicamente por la parte superior. El enorme consolidómetro se montó sobre un marco de carga con velocidad constante de deformación; la carga se transmitió a la muestra a través de una tapa de PVC de 90 mm de espesor. Una celda de fuerza en la parte superior registró la fuerza total recibida y dos transductores de desplazamiento diametralmente opuestos sobre la tapa hacían lo propio con la deformación. La presión de poro se registró en cuatro zonas de la muestra por medio del mismo número de transductores de presión, uno situado en el centro de la base y tres más colocados en el interior de la muestra a 50 mm de altura respecto a la base, con separación de 120° entre cada uno; así mismo se registró la presión atmosférica mediante un transductor. El registro de las ocho variables se realizó en forma automática con intervalos de veinte minutos, para lo que se utilizó un sistema de adquisición de datos.

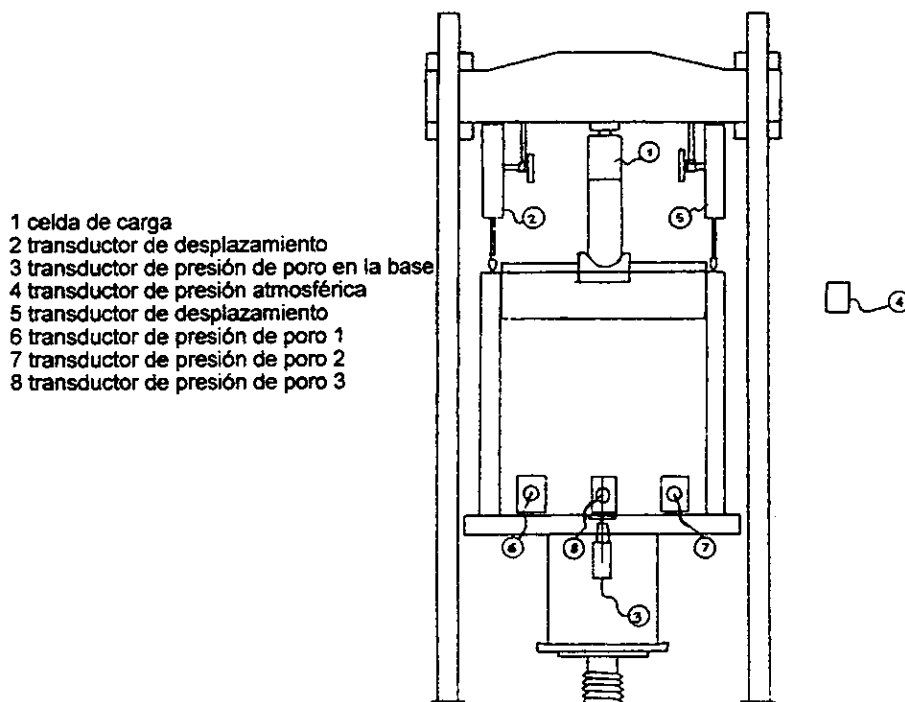


Figura 2.19 Consolidómetro VCD para rellenos hidráulicos (Mendoza y Hartlén, 1985)

Paniagua y Jaime (1991), desarrollaron en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en México, un aparato de prueba para realizar ensayos de consolidación con esfuerzo controlado incremental, ECI. Con este equipo era posible aplicar contrapresión para saturar la muestra y dar carga sostenida en forma neumática. El aparato de prueba disponía de un transductor de presión de poro para medir la presión de agua intersticial en la base del espécimen.

Paniagua y Jaime (1991), hicieron algunas adaptaciones al aparato de prueba descrito, para desarrollar pruebas de consolidación con velocidad constante de deformación VCD. En la fig. 2.20 se muestra una vista del equipo referido. El equipo VCD consistía de un consolidómetro de anillo fijo de 50 cm² de área y 20 mm de altura, el odómetro se colocó dentro de una cámara triaxial a la que se aplicó contrapresión antes de iniciar el ensayo con la finalidad de saturar la muestra; el conjunto se sometió a deformación con velocidad constante por medio de la acción de un marco de carga, un anillo de carga colocado entre la viga de reacción del marco de carga y la cámara triaxial indicó la fuerza total aplicada y un micrómetro se encargó de mostrar la deformación vigente. La base del consolidómetro se conectó a un transductor de presión de poro que indicó la presión de agua intersticial en la muestra. La toma periódica de lecturas se realizó en forma manual, utilizando un puente de Wheatstone digital para los registros del transductor de presión de poro.

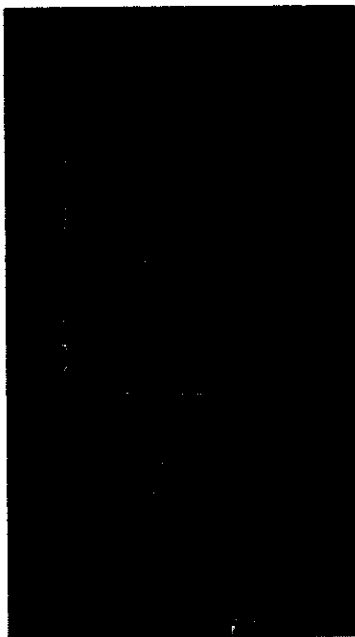


Figura 2.20 Consolidómetro VCD de la DEPMI (Paniagua y Jaime, 1991)

2.8.5 Consolidómetro estándar normado por la ASTM

A partir de 1989, la ASTM¹ fijó una norma para la prueba de consolidación con velocidad controlada de deformación (ASTM D 4186, 1989). En el método, se describe un aparato de prueba que es capaz de aplicar contrapresión y se señalan las características que deben cubrir los componentes. Básicamente en la norma se indica que el aparato de prueba deberá contar con un marco de carga con suficiente control y precisión para imponer a la muestra una velocidad de deformación constante; un medidor de fuerza (celda de carga, anillo de carga, celda hidráulica) para registrar la fuerza total aplicada al espécimen, que deberá ser suficientemente rígido para evitar desplazamientos y contará con precisión mínima de 0.25 % de la carga máxima aplicada; un transductor diferencial de presión para registrar por una parte la presión de poro en la base de la muestra y por otra la contrapresión de saturación, este dispositivo deberá tener una resolución de 0.25% de la máxima presión de poro esperada; un regulador de presión capaz de aplicar y controlar contrapresión con precisión de ± 2.0 %, este dispositivo deberá estar conectado a la base y a la cara superior de la muestra; un transductor de desplazamiento con sensibilidad de 0.002 mm y carrera mínima de 50 % de la altura de la muestra; un consolidómetro de anillo fijo con piedras porosas en ambas caras para alojar muestras de cuando menos 50 mm de diámetro y 20 mm de altura observando una relación mínima entre las dos dimensiones de 2.5, la base deberá estar unida herméticamente con el anillo y será capaz de soportar presiones internas de hasta 1400 kPa (14 kg/cm²), el diseño deberá ser tal que se evite atrapar aire entre la muestra y la base. En la norma se indica que deberán tomarse lecturas periódicas con suficiente regularidad pero no se detalla el sistema de adquisición de datos.

¹ La ASTM (American Society for Testing and Materials) es la organización científica y técnica fundada en 1898, que reglamenta los métodos de prueba de materiales, productos, sistemas y servicios, promocionando el conocimiento de ellos.

2.9 COMPENDIO

El equipo para realizar ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, que se describió en este capítulo, es un prototipo que está conformado por elementos individuales convenientemente dispuestos que trabajan en forma coordinada.

Para lograr el correcto funcionamiento del prototipo VCD, se realizaron numerosas calibraciones y pruebas preliminares, con las que se garantiza la eficiencia del mismo.

De acuerdo a la naturaleza de su función, los componentes se agruparon en tres categorías: aparato de prueba, sistema de adquisición de datos y elementos de programación.

El registro de las variables durante el ensayo VCD es automático y pueden monitorearse en tiempo real a través de la pantalla de la computadora. La reducción de los registros es igualmente automática lo que representa la rápida entrega de resultados del suelo en estudio, aunada al de por sí veloz ensayo VCD.

El costo del prototipo VCD es un factor que debe analizarse por las compañías e instituciones que deseen adquirir equipos de esta naturaleza. Como referencia se puede afirmar que el costo del prototipo VCD resulta menor al de los equipos integrales que se ofertan en el mercado.

Los equipos para realizar pruebas de consolidación con VCD, han evolucionado a la par de los avances tecnológicos, en especial en lo referente al sistema de adquisición de datos; baste dar un vistazo al equipo de Crawford (1964) y al de Smith y Wahls (1969) para deducir que la toma de registros se realizó obligadamente en forma manual. El prototipo de consolidómetro VCD que se describió en este capítulo es, sin duda, el primero en nuestro país que realiza el monitoreo en forma automática.

En la actualidad la norma ASTM D4186 (1989) señala los requerimientos básicos que debe cumplir el aparato de prueba de un equipo VCD. El prototipo VCD que se describió en este capítulo, cumple sobradamente con la norma, con la salvedad de que no cuenta con el sistema para saturar la muestra mediante la aplicación de contrapresión.

CAPÍTULO 3

CALIBRACIONES Y ENSAYES PRELIMINARES

3.1 INTRODUCCIÓN

Los elementos que constituyen un equipo de medición, deben evaluarse antes de aplicarse al fenómeno en estudio. El proceso de evaluación del equipo de medición garantiza registros confiables de las variables que se requieren conocer, además de que permite conocer el grado de precisión con que se está midiendo tal o cual variable, con lo que se pueden realizar ajustes posteriores.

El prototipo para realizar pruebas de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, es en buena medida un equipo de medición, debido a que entre sus componentes cuenta con tres transductores electrónicos de gran precisión, a saber: el transductor de presión de poro, la celda de fuerza y el transductor de desplazamiento, mismos que trabajan en forma coordinada con el sistema de adquisición de datos, según se describe en el capítulo precedente.

Por lo anterior, fue necesario realizar calibraciones de los tres transductores electrónicos, con lo que se obtuvieron correlaciones entre sus voltajes de respuesta que emiten durante el ensaye y las unidades ingenieriles de presión, fuerza y desplazamiento. Típicamente, las relaciones de calibración son lineales, por lo que es posible obtener pendientes o factores de calibración en forma de ecuaciones, que se utilizan para la reducción de los registros del ensaye.

Así mismo, se realizaron pruebas preliminares con el sistema de adquisición de datos del prototipo, con el objeto de determinar una configuración acorde con las señales de los transductores y en general con los requerimientos de la prueba VCD. Se verificó el correcto funcionamiento de la máquina de compresión (velocidad del plato), se calibró por compresibilidad el aparato de prueba VCD, así como un consolidómetro con dispositivo de carga tradicional con el que se realizaron ensayes comparativos.

En el presente capítulo, se describen los procedimientos y el equipo utilizado para las calibraciones de los componentes del prototipo VCD, indicando los factores o ecuaciones que se obtuvieron de las mismas y la forma en que se utilizan para la reducción de los registros del ensaye. Se indica el procedimiento para la calibración por compresibilidad del aparato de prueba VCD, así como el procedimiento para la calibración de un consolidómetro tradicional del Instituto de Ingeniería, UNAM. Igualmente, se describen las pruebas preliminares que se realizaron con el sistema de adquisición de datos.

En el desarrollo del capítulo, se hacen observaciones sobre los resultados observados.

3.2 VERIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN QUE SE INDICA EN EL TABLERO DE CONTROL DE LA MÁQUINA DE COMPRESIÓN TRITECH 10

La máquina de compresión del prototipo VCD, tiene un motor eléctrico de gran precisión que mueve con velocidad constante al plato que comprime la muestra, según se explica en el capítulo 2. La velocidad constante del plato, se selecciona desde el tablero de control de la máquina de compresión y puede variar en el intervalo de 0.00001 mm/min a 5.99999 mm/min.

Inicialmente, se verificó que las velocidades de deformación que se seleccionaron en el tablero de control de la máquina de compresión, correspondieran a aquéllas con las que efectivamente se movió el plato de compresión. La comprobación anterior fue muy importante puesto que los resultados de compresibilidad y permeabilidad que se obtienen de un ensayo VCD, dependen en forma directa de la velocidad de deformación impuesta (en el capítulo 4 se analiza el efecto de la velocidad de deformación en los resultados de los ensayos VCD). Enseguida se describe el procedimiento utilizado para verificar el correcto funcionamiento de la máquina de compresión.

3.2.1 Procedimiento

Se utilizaron un micrómetro con precisión de 1/100 mm y carrera de 20 mm (el desplazamiento máximo que cubre el plato es de 70 mm), un cronómetro con precisión de 1/10 segundos, un brazo mecánico con base imantada y un nivel de mano. En la fig. 3.1 se ilustra la disposición de los elementos atinentes durante el proceso de comprobación.

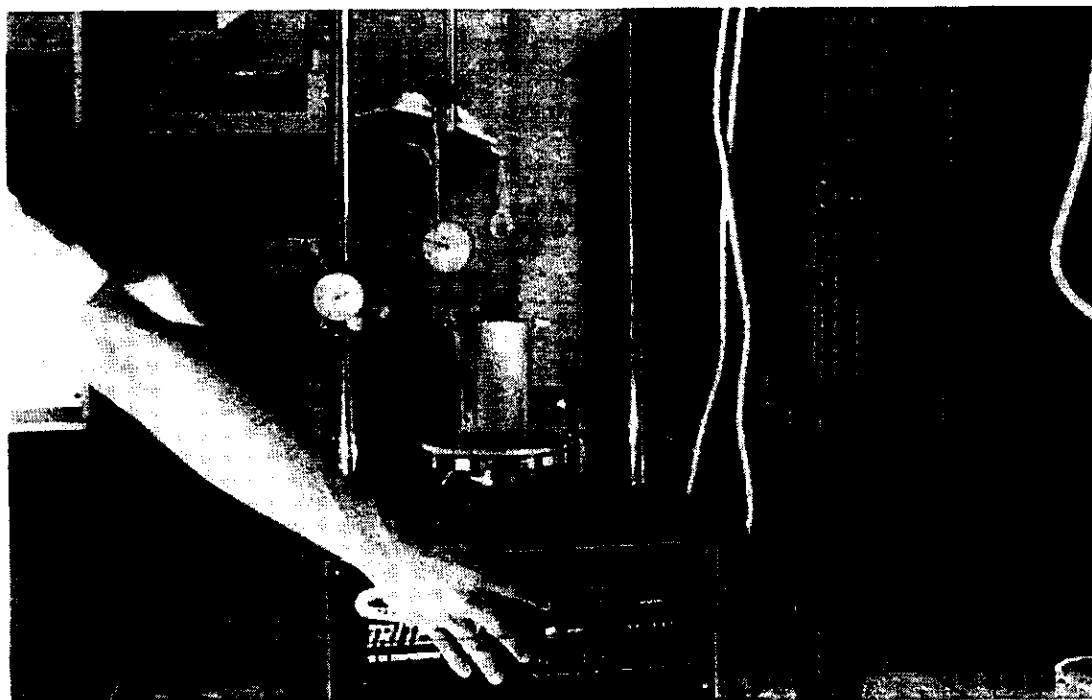


Figura 3.1 Vista del proceso de comprobación de las velocidades de la máquina de compresión

Con la ayuda del brazo mecánico, se colocó el vástago del micrómetro sobre el pedestal del consolidómetro a su vez montado sobre el plato de la máquina de compresión, todo debidamente nivelado de forma tal que al accionar la máquina de compresión el micrómetro pudiera registrar la distancia vertical recorrida por el plato. Una vez que se preparó el equipo de medición, se registró la lectura inicial del micrómetro; posteriormente se seleccionó una velocidad en el tablero de control y se activó la máquina de compresión, con lo que el plato comenzó su movimiento con velocidad constante en las direcciones hacia arriba o hacia abajo, según la selección, y el micrómetro comenzó a registrar el desplazamiento del mismo. Simultáneamente al arranque de la máquina de compresión, se activó el cronómetro para llevar el registro del tiempo; transcurrido un lapso conocido, se detuvieron simultáneamente la máquina de compresión y el cronómetro, entonces se registró la lectura final del micrómetro y el tiempo que se consumió, con lo que se estimó una velocidad "medida" al dividir el desplazamiento recorrido por el plato entre el tiempo que le tomó hacerlo; finalmente, la velocidad medida se comparó contra la que se seleccionó inicialmente en el tablero de control. El proceso descrito se repitió tantas veces cuantas velocidades del tablero de control se seleccionaron. En la tabla 3.1 se resumen algunos de los resultados que se observaron en la comprobación de velocidades del plato de la máquina de compresión.

Tabla 3.1 Resultados sobre la verificación de la velocidad de deformación de la máquina de compresión

No. de lectura	Velocidad del tablero de control mm/min	Lectura inicial del micrómetro mm	Lectura final del micrómetro mm	Desplazamiento del plato mm	Lectura de cronómetro min	Velocidad medida mm/min
1	0.10000	2.230	3.242	1.012	10.000	0.10120
2	0.10000	3.235	2.250	0.985	10.000	0.09850
3	0.01000	2.445	2.495	0.050	5.000	0.01000
4	0.01000	4.313	4.264	0.049	5.000	0.00980
5	0.01000	2.94	3.160	0.220	22.000	0.01000
6	0.00200	4.208	4.259	0.051	29.000	0.00176

Debido a que los lapsos en los que se midió la velocidad del plato fueron muy cortos, se observó que algunas de las velocidades seleccionadas en el tablero de control no fueron coincidentes con las medidas (ver tabla 3.1), por lo que se siguió un método alternativo de comprobación, en el que se registró nuevamente la lectura inicial del micrómetro, se seleccionó una velocidad del tablero de control y al igual que en el proceso anterior se activaron al mismo instante el cronómetro y la máquina de compresión, con la diferencia de que ahora se hicieron lecturas periódicas del micrómetro sin variar la velocidad seleccionada. El proceso continuó hasta que la carrera del micrómetro estaba próxima a terminarse. La velocidad medida se obtuvo restando a la lectura inicial del micrómetro las lecturas periódicas y dividiendo las diferencias entre el tiempo transcurrido correspondiente. En la tabla 3.2 se resumen algunos de los resultados de este último método.

3.2.2 Observaciones

En las tablas 3.1 y 3.2 se resumen resultados de las pruebas para corroborar las velocidades de deformación que se seleccionan en el tablero de control de la máquina de compresión, las cuales se realizaron con los métodos que se describen en los párrafos de arriba. Se probaron velocidades desde 0.001 mm/min hasta 5.00 mm/min, haciendo mayor número de comprobaciones con las

velocidades típicas de un ensaye VCD (menores a 0.01000 mm/min). De la tabla 3.2 se observa que para velocidades menores a 0.10 mm/min, existe, en los primeros minutos, una dilación para alcanzar la velocidad seleccionada en el tablero de control; de manera práctica se puede considerar despreciable esta “aceleración inicial”, debido a que el tiempo de duración del ensaye VCD es típicamente de 24 a 48 horas, con lo que la pequeña discrepancia de velocidad inicial, se disipa durante el transcurso de la prueba. Por lo anterior, puede afirmarse que las velocidades que se seleccionan en el tablero de control de la máquina de compresión se cumplen fielmente y por tanto los resultados de los ensayes VCD no se ven afectados en ninguna forma.

Tabla 3.2 Resultados sobre la verificación de la velocidad de deformación de la máquina de compresión con lecturas periódicas

Velocidad del tablero de control mm/min	No. de lectura	Lectura inicial del micrómetro mm	Desplazamiento del plato mm	Lectura de cronómetro min	Velocidad medida mm/min
0.0040	1	2.151	0.000	0.000	0.00000
	2	2.200	0.049	15.750	0.00311
	3	2.311	0.160	45.000	0.00356
	4	2.362	0.211	58.000	0.00364
	5	2.469	0.318	83.000	0.00383
	6	2.505	0.354	92.500	0.00383
	7	2.565	0.414	107.500	0.00385
	8	2.592	0.441	114.000	0.00387
	9	2.790	0.639	163.500	0.00391
	10	2.825	0.674	168.500	0.00400
	11	2.904	0.753	188.400	0.00400

3.3 CALIBRACIÓN DEL TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DE PORO PDCR 810

El transductor de presión de poro que se describe en el capítulo anterior, es un dispositivo electrónico que se alimenta con voltaje y que responde con variaciones de señal de la misma naturaleza para las distintas condiciones de presión que sobre éste obren; es decir, que para cada variación de presión corresponde una variación de voltaje. Con la calibración se estableció una correlación entre las variaciones de voltaje y sus correspondientes unidades ingenieriles de presión, la cual se define por una ecuación lineal que se utiliza en la hoja de cálculo (capítulo 2) para reducir los registros de voltaje a unidades de presión.

3.3.1 Procedimiento

Para realizar la calibración del transductor de presión de poro, se utilizaron un regulador de presión con carátula, capaz de aplicar 979 kPa (10 kg/cm²) y con precisión de 4.9 kPa (0.05 kg/cm²), una fuente de poder con selector de voltaje, un voltímetro digital, un tanque de presión y misceláneos tales como sellador, jeringa, jabón y otros.

Se llenó con agua al tanque de presión más allá de la mitad de su capacidad (19 litros); con la ayuda de la jeringa, se saturó el transductor de presión, para lo que se escurrió agua desaerada por la pared interior de éste, cuidando de no dañar el diafragma; posteriormente se sumergió el transductor en el tanque de modo que únicamente la punta (donde se encuentra el diafragma) quedó

en contacto con el agua, entonces se registró la temperatura de la misma; enseguida se cerró herméticamente la tapa del tanque habiendo pasado previamente los cables del transductor por un orificio de ésta; se conectó el tanque al regulador de presión y se sellaron todas las uniones. Para verificar que no existieran fugas de presión, se untaron las uniones de la tapa del tanque y las del orificio de salida del cable con una solución jabonosa, de inmediato se dio un incremento de presión al tanque, si se formaban burbujas en las uniones, se sellaba nuevamente la fuga con el sellador y se repetía el proceso anterior hasta eliminarlas por completo.

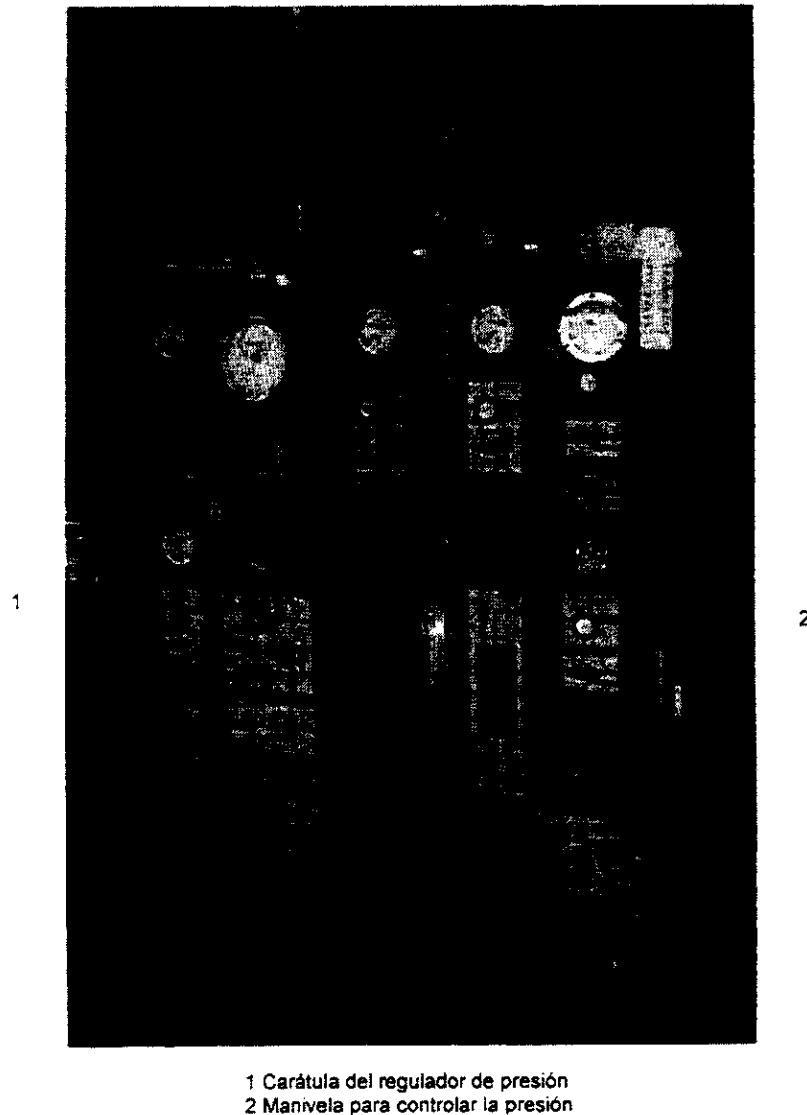


Figura 3.2 *Tablero del regulador de presión empleado en la calibración del transductor de presión de poro PDCR 810*

Una vez dispuesto el equipo para la calibración, por medio de la fuente de poder se alimentó al transductor con 6, 8, 9, 10 y 12 voltios (cuando se realizaron las calibraciones se desconocía el voltaje con el que trabajarían los transductores en el ensaye VCD, que es de 10 voltios, por lo que

se realizaron varias de ellas para distintos niveles de voltaje; de otra forma hubiese bastado la calibración para 10 voltios). Para cada nivel de alimentación, se realizó una calibración según se explica en lo que sigue: se registró la lectura de salida del transductor correspondiente al cero de presión en unidades de milivoltios; por medio del regulador (ver fig. 3.2) se dieron cuatro o cinco incrementos de presión al tanque de aproximadamente 4.9 kPa (0.05 kg/cm²), y después se dieron incrementos mayores de magnitud variable hasta llegar a 196.4 kPa (2 kg/cm²) de presión total; para cada incremento, se registró la lectura correspondiente de voltaje del transductor. Una vez que se alcanzó el valor límite de presión, se realizó un ciclo de descarga, dando ahora decrementos de presión de aproximadamente la misma magnitud que los de la historia de carga, registrando para cada uno de ellos las respectivas lecturas de voltaje del transductor.

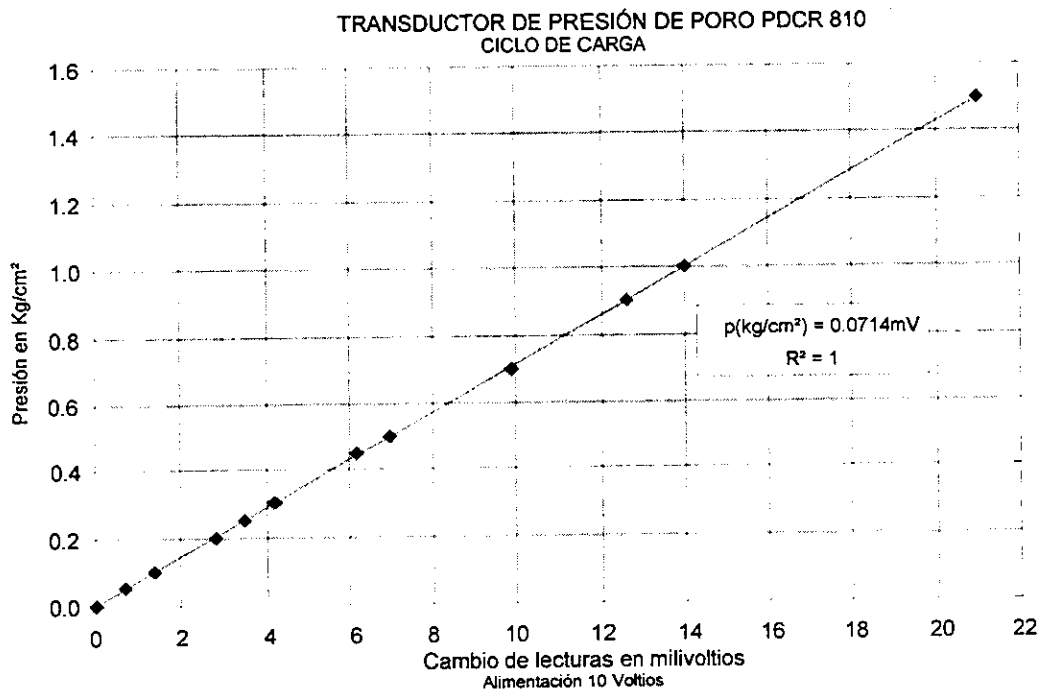


Figura 3.3 Gráfica de calibración del transductor de presión de poro; ciclo de carga

3.3.2 Observaciones

Con los datos que se registraron en las calibraciones, se hicieron gráficas de variaciones de voltaje del transductor de presión de poro contra presión en unidades ingenieriles. En las figs. 3.3 y 3.4 se presentan las gráficas de calibración para los ciclos de carga y descarga, así como las ecuaciones que definen la tasa de variación de cada ciclo. Las gráficas que se presentan aquí, corresponden a la calibración de 10 voltios, que es el nivel de alimentación con el que trabajan los transductores durante el ensaye, según se dijo antes.

Con las ecuaciones de carga y descarga, es posible determinar la presión de poro en la base de la muestra durante el ensaye VCD, para lo que se procede como a continuación se explica: debido a que el sistema de adquisición de datos que se describe en el capítulo anterior, amplifica con ganancia de 200 las señales del transductor de presión de poro, y posteriormente el programa registra los valores amplificados en el archivo de datos en unidades de voltios, para calcular la

presión de poro en el ensaye, bastará con dividir la lectura registrada en el archivo de datos entre 200 (ganancia), para luego multiplicarla por 1000 (conversión a milivoltios, debido a que la calibración se hizo con estas unidades) y finalmente se debe sustituir el valor que resulte en la ecuación de carga o descarga, según corresponda. La hoja de cálculo para la reducción de los registros (ver fig. 2.13) se programó para realizar estos cálculos automáticamente.

Obsérvese que las pendientes que se obtuvieron para los ciclos de carga y descarga de las figs.3.3 y 3.4, no son iguales sino que tienen una pequeña variación, éste comportamiento histerético, aunque mínimo, es típico de los transductores por lo que los fabricantes lo consideran en las especificaciones del dispositivo. Por otra parte, debe decirse que no se realizaron correcciones por temperatura para las calibraciones, tomando en cuenta que tanto las calibraciones como los ensayes se realizan con agua a la temperatura ambiente (las calibraciones se realizaron con agua a $20^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$).

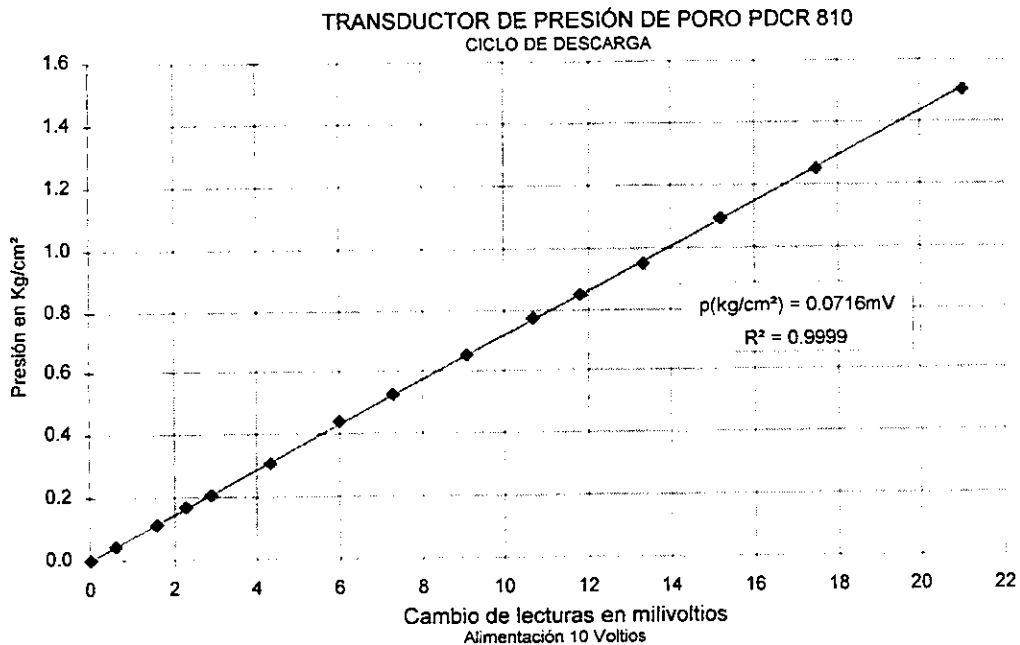


Figura 3.4 Gráfica de calibración del transductor de presión de poro; ciclo de descarga

3.4 CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE FUERZA TC-S

La celda de fuerza del prototipo VCD, es un elemento de aluminio en forma de "S" que se alimenta con voltaje de corriente directa y responde con señales de la misma naturaleza para las distintas condiciones de fuerza que sobre ésta actúan. Con la calibración de este dispositivo electrónico, se estableció una relación entre las variaciones de voltaje y las fuerzas actuantes en la celda para finalmente conocer el esfuerzo total que recibe la muestra durante el ensaye VCD. A continuación se describe el procedimiento de calibración.

3.4.1 Procedimiento

La celda de fuerza se calibró con la ayuda de una balanza Toledo (Instituto de Ingeniería, UNAM) con capacidad de 4.9 kN (500 kg) y precisión de 9.8 N (1 kg); se utilizaron también una fuente de poder con regulador de voltaje y un voltímetro digital. Primeramente se ajustó la altura del marco de carga de la balanza para llevarlo al contacto con la celda, entonces se ajustó el cero de la balanza. Una vez dispuesta la celda en el marco de carga, por medio de la fuente de poder se alimentó con 8, 10, 12 y 15 voltios (la celda se alimenta con 10 voltios durante el ensaye VCD); para cada nivel de alimentación se realizó una calibración como a continuación se indica: se tomó la lectura de voltaje de salida de la celda de fuerza correspondiente a cero de carga de la balanza; por medio de la balanza Toledo, se dieron incrementos de carga de 98 N (10 kg) hasta alcanzar 980 N (100 kg), y a continuación se dieron incrementos de 392 N (40 kg) hasta alcanzar la capacidad máxima de la celda de 4.45 kN (454 kg). Para cada incremento de carga, se registró la correspondiente lectura de voltaje de la celda mediante el voltímetro digital, así como la lectura de carga de la balanza. Una vez que se alcanzó un valor de carga cercano a la capacidad máxima de la celda, se dio un ciclo de descarga dando ahora decrementos y registrando las correspondientes lecturas de voltaje de la celda así como las lecturas de carga de la balanza. Con los datos registrados de las calibraciones, se obtuvieron gráficas de variación de voltaje contra fuerza en ciclos de carga y descarga.

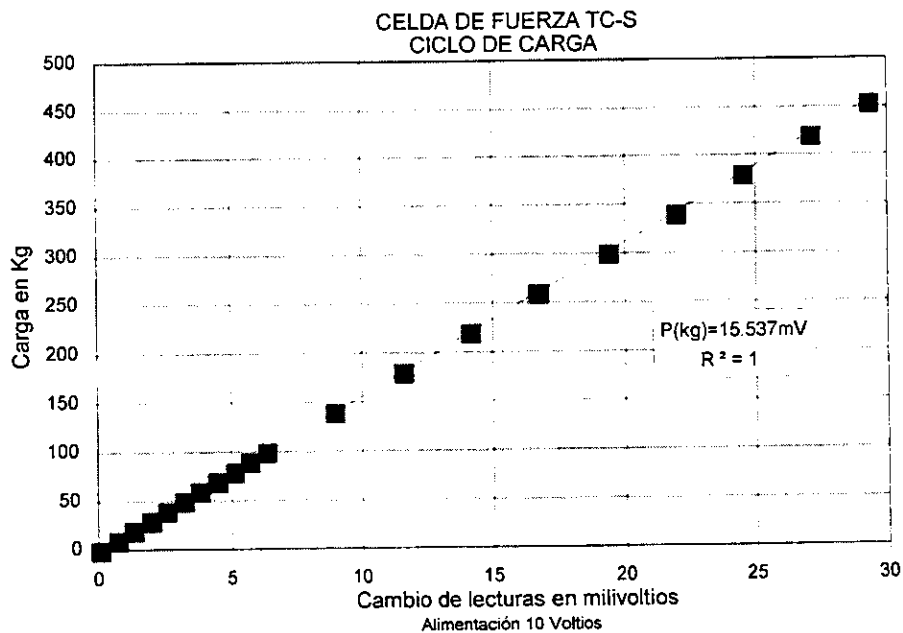


Figura 3.5 Gráfica de calibración de la celda de fuerza, ciclo de carga

3.4.2 Observaciones

En las figs. 3.5 y 3.6, se muestran las gráficas de calibración de la celda de fuerza en el ciclo de carga y de descarga para la alimentación de 10 voltios, que corresponde al nivel de alimentación con el que trabaja la celda durante el ensaye VCD. Para cada ciclo de calibración, se estimó la ecuación que define la tasa de variación, con la que se conoce la fuerza que recibe la muestra

durante el ensaye, para lo que se procede como a continuación se explica: el sistema de adquisición de datos del prototipo amplifica la señal de voltaje de la celda de fuerza con ganancia de 100, y después registra el valor digitalizado de voltaje en el archivo de datos en unidades de voltios; para conocer la fuerza de reacción del suelo, se programó la hoja de cálculo para que divida el registro de voltaje de la celda entre 100 (ganancia), y posteriormente lo multiplique por 1000 para transformar las lecturas a milivoltios, ya que la calibración se realizó con estas unidades, finalmente se sustituyen los valores resultantes en la ecuación correspondiente (ciclo de carga o descarga) con lo que se obtiene la fuerza en unidades ingenieriles.

Al igual que en la calibración del transductor de presión de poro, se puede apreciar que las pendientes de las líneas rectas (carga y descarga) difieren ligeramente, esto debido a la histéresis de la celda, la cual se indica en las especificaciones del dispositivo (capítulo 2).

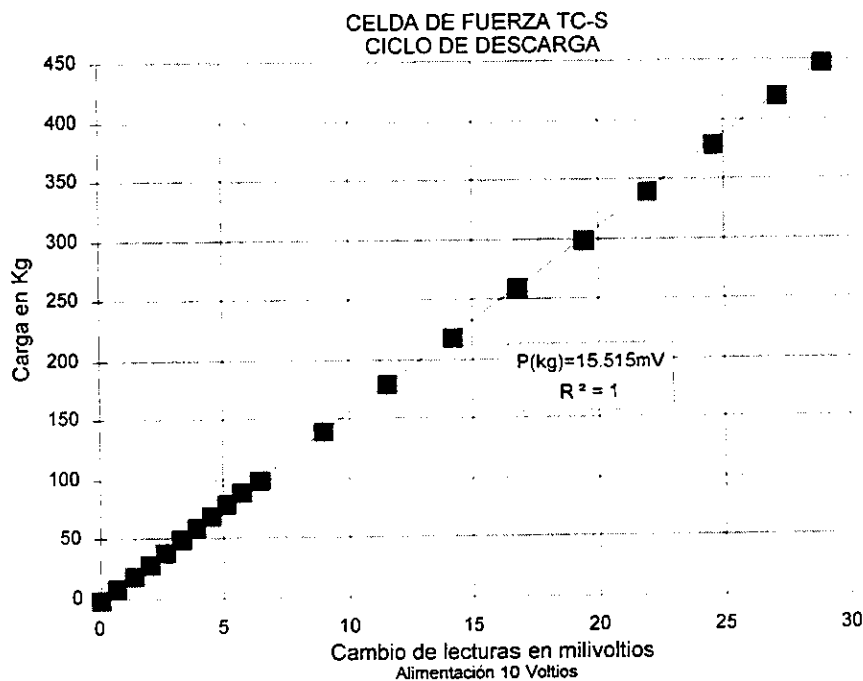
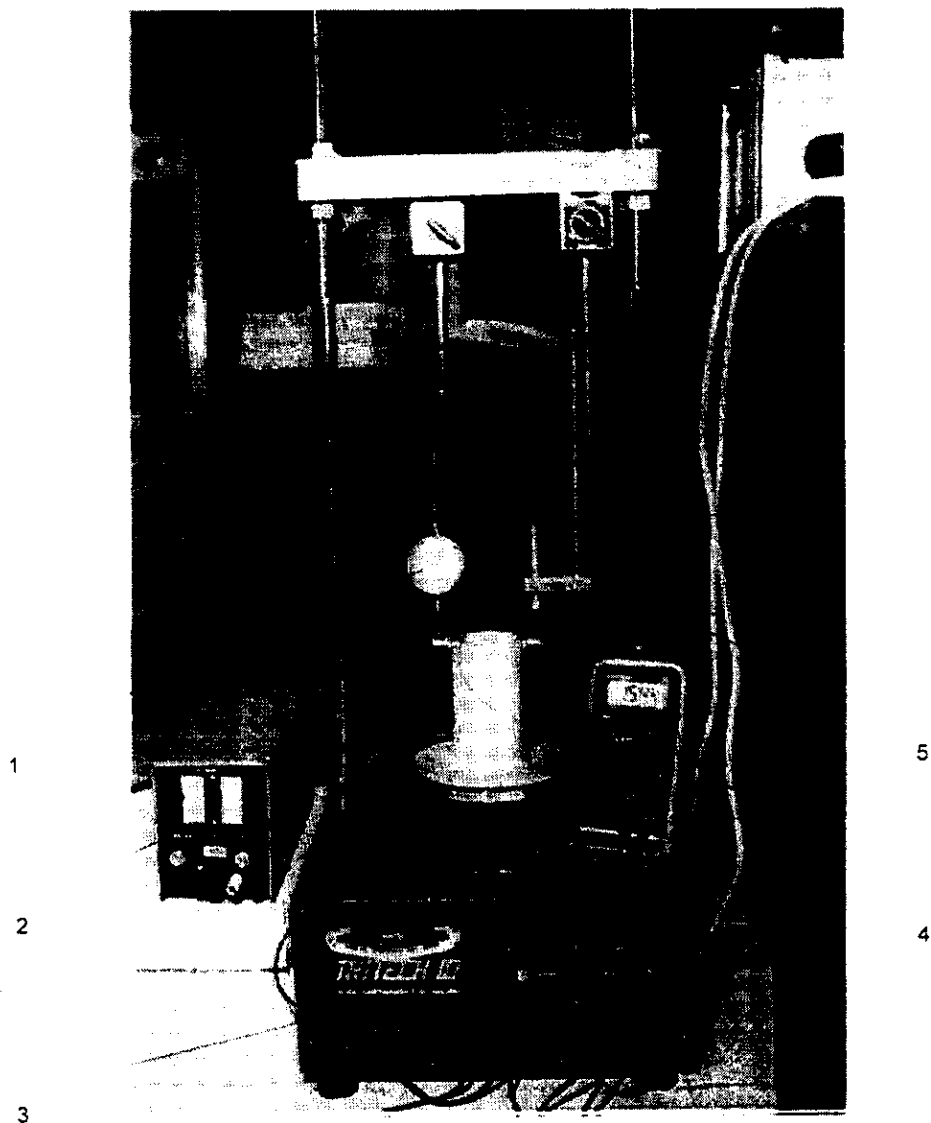


Figura 3.6 Gráfica de calibración de la celda de fuerza, ciclo de descarga

3.5 CALIBRACIÓN DEL TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO DC-DC 240

El transductor de desplazamiento que se utiliza en el equipo prototipo, es un transformador diferencial lineal envuelto en un cilindro metálico, dentro del cual corre axialmente una barra también metálica que genera distintos voltajes de salida de acuerdo a su posición. De manera análoga a los procedimientos de calibración del transductor de presión de poro y de la celda de fuerza, se estableció una relación entre las variaciones de voltaje que emite el transductor de desplazamiento y la distancia que recorre la barra metálica. Con los registros de la calibración, se hicieron gráficas de variación de voltaje contra desplazamiento y se estimó una ecuación con la que se puede interpretar la señal del citado transductor para conocer la deformación de la muestra durante el ensaye VCD. A continuación se describe el procedimiento referido.



- 1 Micrómetro
- 2 Fuente de poder con selector de voltaje
- 3 Tablero de control de la máquina de compresión
- 4 Voltímetro digital
- 5 Transductor de desplazamiento DC-DC 240

Figura 3.7 Vista del proceso de calibración del transductor de desplazamiento DC-DC 240.

3.5.1 Procedimiento

Se utilizaron un micrómetro con precisión de 1/100 mm y carrera de 20 mm, una fuente de poder con selector de voltaje, un voltímetro digital, dos brazos mecánicos, un nivel de mano y la máquina de compresión. En la fig. 3.7 se muestra la colocación de los elementos citados durante el proceso de calibración.

Inicialmente, se ajustaron los brazos mecánicos para fijar el micrómetro y el transductor de desplazamiento sobre el pedestal del consolidómetro, este último montado a su vez sobre el plato de compresión; de manera similar a lo realizado para la comprobación de la velocidad del plato de compresión (ver fig. 3.1), de esta forma los vástagos que registran el desplazamiento de ambos dispositivos recorrieron exactamente la misma distancia cuando se accionaba la máquina de compresión. Mediante la fuente de poder, se alimentó al transductor de desplazamiento con 6, 8, 10, y 12 voltios; para cada nivel de alimentación se realizó una calibración según se explica en lo que sigue.

Se registró la lectura de voltaje del transductor de desplazamiento correspondiente a la posición inicial, de igual forma se registró la lectura del micrómetro; posteriormente, se elevó el plato de la máquina de compresión en incrementos de aproximadamente 0.1 mm; se registraron entonces las nuevas lecturas del transductor de desplazamiento y del micrómetro; enseguida se dieron incrementos sucesivos de desplazamiento al plato de compresión, registrando para cada uno de ellos las lecturas correspondientes del micrómetro y del transductor. El proceso descrito continuó hasta observar que la carrera del transductor estaba próxima a terminarse. Con los datos registrados se asociaron desplazamientos conocidos del micrómetro contra variaciones de voltaje del transductor.

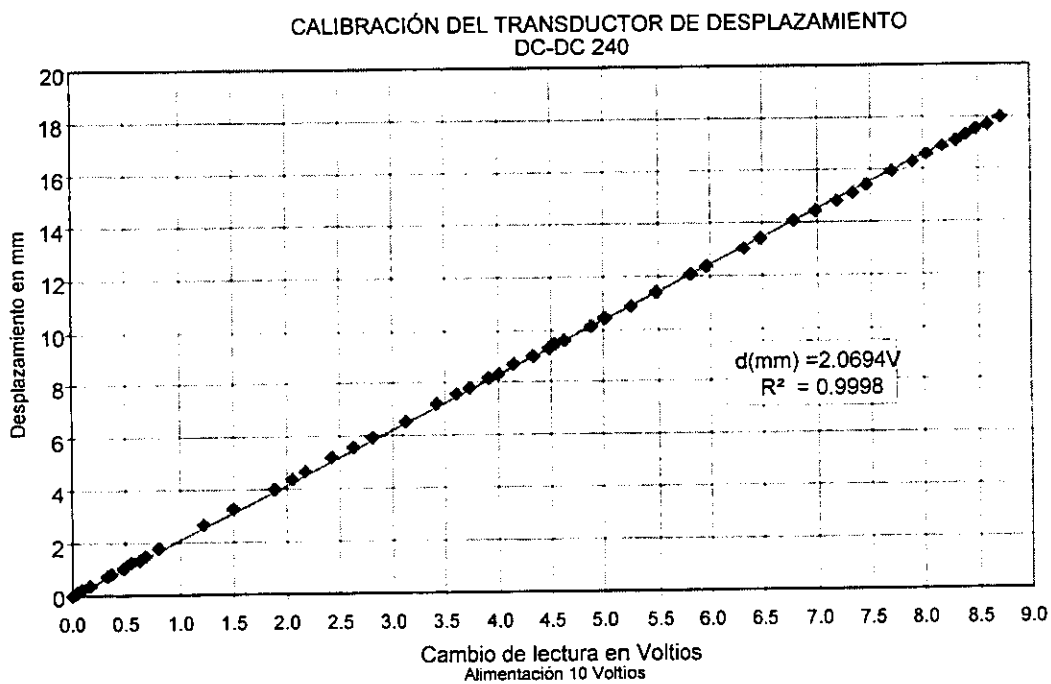


Figura 3.8 Gráfica de calibración del transductor de desplazamiento DC-DC 240

3.5.2 Observaciones

En la fig. 3.8, se muestra la gráfica de calibración del transductor de desplazamiento para la alimentación de 10 voltios, que es el nivel con el que se alimenta al transductor durante el ensaye VCD. Se calculó la ecuación que define a la recta de calibración, con la que se pueden interpretar

las variaciones de voltaje del transductor para obtener la deformación de la muestra durante el ensaye; para ello se sustituye directamente en la citada ecuación el valor de variación de voltaje registrado en el archivo de datos, ya que la señal de este transductor no se afecta por ninguna ganancia durante el ensaye y la calibración se realizó en unidades de voltios.

De la fig. 3.8, se observó que se pueden cubrir hasta 19 mm de desplazamiento con perfecta linealidad, tal como lo indican las especificaciones del dispositivo, lo cual es suficiente para registrar la deformación de la muestra durante el ensaye VCD, pues la altura del anillo es de 26.84 mm. Por otra parte, es bien sabido que cuando la barra del transductor está cerca de los extremos del cilindro, la gráfica adopta una clara tendencia curva, por lo que se deberá tener especial cuidado al efectuar los ensayos VCD, en asegurarse que de acuerdo a la posición de la barra del transductor, se trabaje en el rango lineal de la gráfica; en esto mucho ayuda la posición del centro eléctrico del transductor (ver fig. 2.7)

3.6 PRUEBAS PRELIMINARES CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y EL PROGRAMA DAQWare

El sistema de adquisición de datos del prototipo VCD se encarga, entre otras cosas, de registrar las señales de voltaje que emiten los transductores durante el ensaye VCD para que posteriormente el programa DAQWare pueda mostrar los valores en pantalla y guarde los registros en un archivo de datos; es por ello que una vez que se calibraron el transductor de presión de poro, la celda de fuerza y el transductor de desplazamiento, se hicieron algunas pruebas preliminares con el sistema de adquisición de datos, con el objeto de conocer el modo de operación del sistema y determinar la configuración óptima para los requerimientos de la prueba.

3.6.1 Procedimiento

El primer objetivo del proceso, consistió en mandar al sistema de adquisición de datos un voltaje conocido y estable por medio de una fuente de poder externa, y verificar que el sistema lo reconociera; para ello se preparó convenientemente el acondicionador de señales y la tarjeta de conversión A/D, así como el programa de adquisición DAQWare para monitorear los voltajes vía pantalla mediante la opción *Analog Input* de la función Utilities, según se describe en el capítulo 2. Por medio de la fuente de poder externa, se mandó un voltaje conocido y estable al canal 0 de la tarjeta A/D a través de la terminal de conectores del acondicionador, se observó entonces el valor digitalizado de voltaje en la pantalla de la PC del canal conectado; en un principio la señal digitalizada que se observó en la pantalla no correspondía al valor de voltaje de la fuente de poder y había gran inestabilidad en la misma, por lo que se realizaron algunos ajustes a la configuración del acondicionador de señales y de la tarjeta A/D en forma física "hardware" y programática "software" (ver tablas 2.1 y 2.2) hasta lograr compatibilidad entre la señal emitida al sistema y la señal reconocida por el mismo. Una vez que se logró compatibilidad en las señales, por medio de la fuente se dieron variaciones de voltaje al sistema moviendo el selector de la fuente de poder, y se corroboró que las mismas variaciones fueran observadas en el monitor de la PC en tiempo real. El proceso descrito se repitió para los canales 1 y 2 de tal forma que al finalizar todo el proceso se comprobó el reconocimiento de voltajes por el sistema de adquisición de datos para los tres canales que se utilizan durante el ensaye VCD.

Una vez que se estableció el reconocimiento de voltajes por el sistema de adquisición de datos en forma correcta, se conectaron el transductor de presión de poro, la celda de fuerza y el transductor de desplazamiento a los canales 1, 2 y 0 de la tarjeta A/D respectivamente y se les dieron condiciones de presión, fuerza y desplazamiento conocidos y estables, con la finalidad de constatar que las condiciones físicas respectivas correspondieran a los voltajes observados en el monitoreo, para ello se hizo referencia a las gráficas y ecuaciones obtenidas en la calibración de cada transductor según se indica en incisos anteriores de este capítulo. Después de constatar la compatibilidad entre el estímulo físico estable proporcionado al transductor y el voltaje reconocido por el sistema, se dieron variaciones de presión, desplazamiento y fuerza a los transductores respectivos y se verificó la velocidad de respuesta del sistema que como se esperaba, resultó inmediata.

3.6.2 Observaciones

La etapa de comprobación anteriormente descrita, fue fundamental para el éxito del proyecto. El proceso de comprobación del sistema de adquisición de datos, se hizo con acercamientos a prueba y error, para lo que se requirió de la lectura de los manuales del usuario editados por la compañía proveedora del equipo. Los resultados observados en las pruebas, garantizan una operación adecuada del sistema de adquisición durante los ensayos VCD.

3.7 DETERMINACIÓN DE LA DEFORMACIÓN DEL APARATO DE PRUEBA VCD PARA CORRECCIÓN DE DEFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Con el objeto de conocer la deformación del aparato de prueba durante los ensayos VCD y con ello determinar la deformación real de la muestra, se realizó una calibración por compresibilidad, la cual consistió en obtener una gráfica de deformación del aparato de prueba contra la carga aplicada. Para realizar la calibración, se utilizaron el transductor de desplazamiento y la celda de fuerza previamente calibrados, un cilindro rígido de acero haciendo las veces de la muestra y en general todo el sistema de adquisición de datos. En el inciso siguiente se describe el procedimiento de calibración.

3.7.1 Procedimiento

Se montó el consolidómetro de anillo fijo sobre el plato de la máquina de compresión tal y como se procede en los ensayos VCD, se colocaron papeles filtro saturados sobre las piedras porosas también saturadas, se colocó el cilindro de acero en lugar de la muestra, se ajustó la columna de carga del consolidómetro sobre el cilindro de acero, se seleccionó del tablero de control de la máquina de compresión una velocidad suficientemente pequeña (0.0001 mm/min) previendo que la carga se incrementaría rápidamente con el consecuente riesgo de dañar la celda de fuerza.

Con el equipo dispuesto, se programó el sistema de adquisición de datos para el almacenaje de valores de carga y deformación que registraron la celda de fuerza y el transductor de desplazamiento respectivamente; a continuación se activó la máquina de compresión con lo que comenzó el registro de señales. Durante todo el proceso de calibración, se monitoreó el valor de la carga y una vez que se alcanzaron 350 kg. se detuvo la máquina de compresión. Con el archivo de

datos de la calibración se hicieron gráficas de deformación del equipo contra carga aplicada, para lo cual se utilizaron las calibraciones de la celda de fuerza y del transductor de desplazamiento que se describen en incisos anteriores.

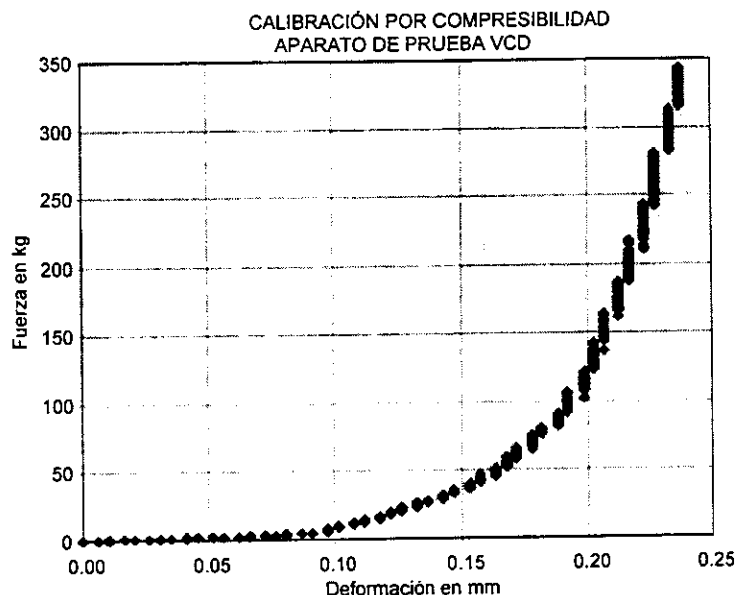


Figura 3.9 Gráfica de compresibilidad del aparato de prueba VCD para corrección de deformación de la muestra

3.7.2 Observaciones

En la fig. 3.9 se presenta la gráfica de calibración del aparato de prueba VCD; es notorio que más del 50% de la deformación del equipo se produce con cargas menores a los 30 kg. Por otra parte, la deformación no excede los 0.25 mm para una carga de 350 kg, que equivale a esfuerzos en la muestra de 7 kg/cm^2 . Debido a la pequeña compresibilidad del equipo, la deformación de la muestra no se corrigió en los ensayos VCD que se presentan en el capítulo 4, aunque para suelos más duros que los ahí mostrados, quizás pueda resultar significativa.

Debe señalarse que la prueba para determinar la compresibilidad del equipo VCD fue en realidad una "prueba piloto de consolidación", puesto que por vez primera se utilizó el sistema de adquisición de datos y el equipo completo con excepción del transductor de presión de poro. Al concluir esta calibración se estaba en condiciones de realizar el primer ensayo de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD.

3.8 CALIBRACIÓN DEL CONSOLIDÓMETRO TRADICIONAL

Dentro de los objetivos de este trabajo, se encuentra la comparación de resultados de consolidación entre ensayos tradicionales de esfuerzo controlado incremental, ECI, y ensayos con velocidad constante de deformación, VCD, con la intención de contar con un punto de referencia para señalar ventajas y eventuales desventajas de una y otra técnica. Por lo anterior, fue necesario

calibrar un consolidómetro con dispositivo de carga incremental comúnmente usado, perteneciente al Instituto de Ingeniería, UNAM. Se realizaron calibraciones por compresibilidad del aparato y por fuerza recibida en la muestra. Enseguida se describen los procedimientos de calibración.

3.8.1 Calibración por compresibilidad

El consolidómetro tradicional del Instituto de Ingeniería, UNAM, cuenta con un sistema de carga conformado por una viga o palanca y un sector de portapesas que cuelga del extremo de ésta, en el que se colocan pesas de plomo (ver fig. 3.10). La calibración por compresibilidad se hizo de acuerdo con el método estándar ASTM D2435 (1990). Se utilizó como muestra un disco metálico rígido de acero inoxidable de dimensiones similares a las de la pastilla de suelo, se colocaron papeles filtros saturados en ambas caras del disco debido a que para los ensayos comparativos (capítulo 4) se procedió en la misma forma. Una vez que se tuvo lista la "muestra" dentro de la cazuela, se tomó la lectura inicial del micrómetro que registra las deformaciones, posteriormente se colocó en el portapesas una secuencia de carga semejante a la que se utiliza en los ensayos tradicionales, en ciclos de carga y descarga; para cada incremento se registró la lectura del micrómetro y el peso total colocado en el portapesas, con los datos observados de la calibración se graficaron deformaciones del aparato contra carga total en el portapesas, las cuales se utilizan para corregir la deformación registrada en los ensayos tradicionales, es decir que a la deformación de la muestra se le resta la deformación del aparato.

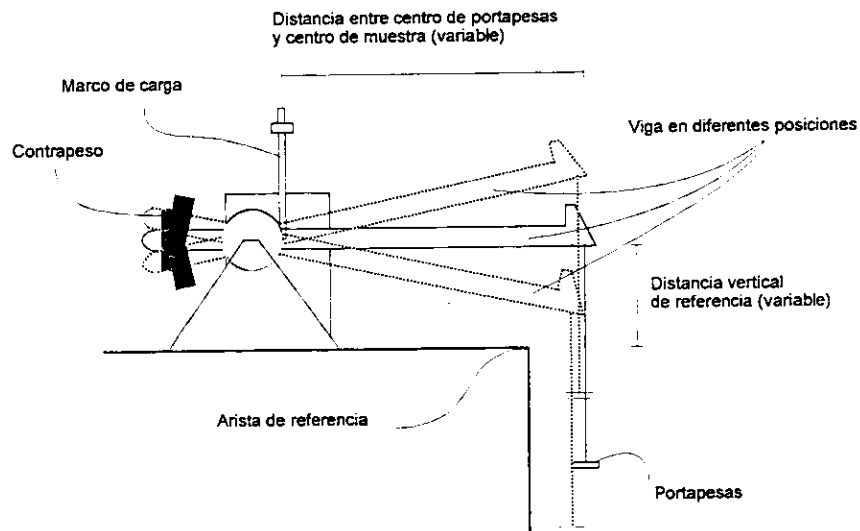


Figura 3.10 Esquema del consolidómetro con dispositivo de carga incremental

El método ASTM D2435 (1990) no menciona realizar varias calibraciones por compresibilidad, sin embargo, previendo que los resultados de calibraciones consecutivas no serían los mismos, se determinó realizar tres calibraciones para obtener una gráfica de carga en portapesas contra deformación, en la que estas últimas fueran el valor medio de las deformaciones medidas en las tres calibraciones, con lo que se obtuvieron las gráficas que se muestran en las figs. 3.11 y 3.12.

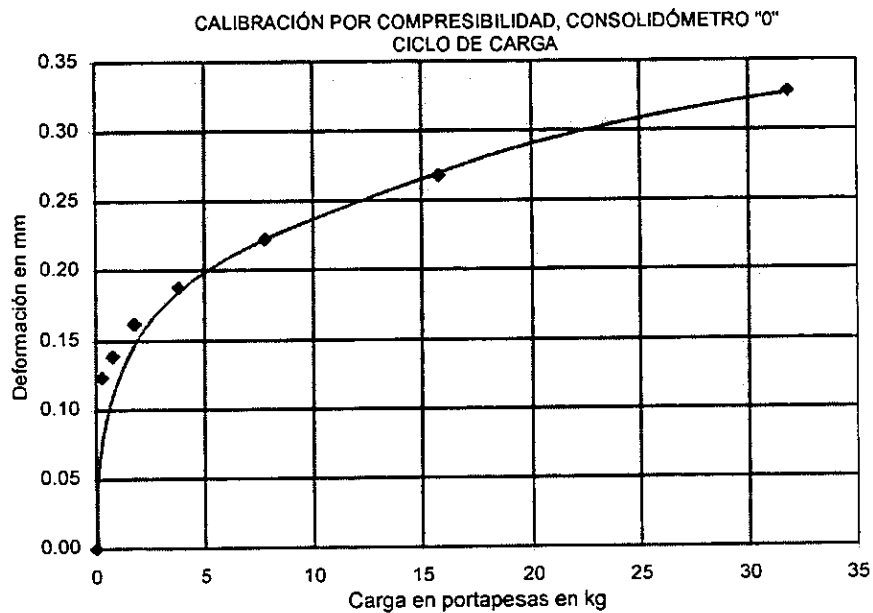


Figura 3.11 Gráfica de calibración por compresibilidad del consolidómetro "0", Instituto de Ingeniería, UNAM; ciclo de carga

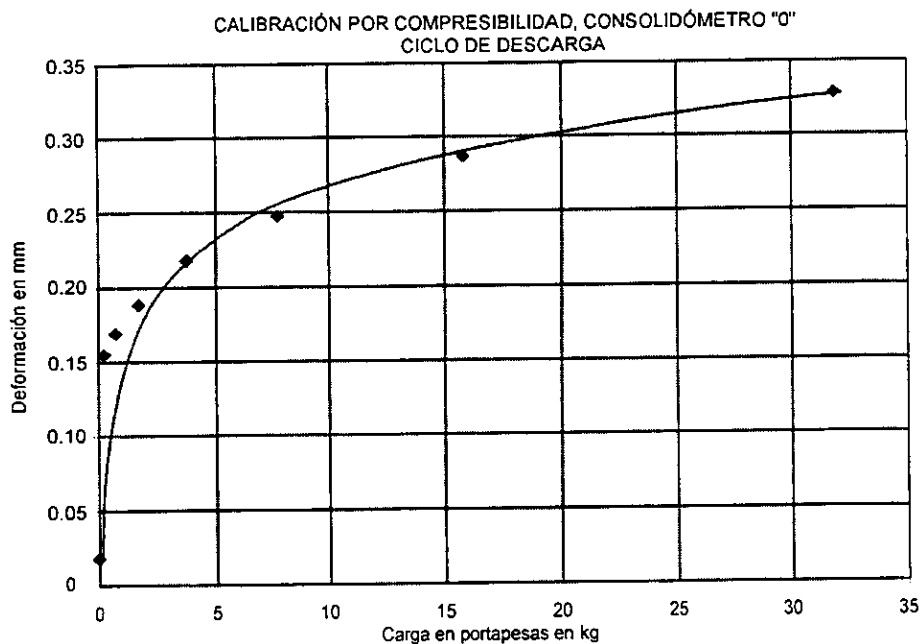


Figura 3.12 Gráfica de calibración por compresibilidad del consolidómetro "0", Instituto de Ingeniería, UNAM; ciclo de descarga

3.8.2 Calibración por fuerza recibida en la muestra

El consolidómetro tradicional del Instituto de Ingeniería, cuenta con una palanca que transmite a la muestra la carga que se coloca en el portapesas multiplicada tantas veces como sea la

distancia entre el centro del portapesas y el centro de la muestra. Para evaluar con precisión la carga recibida en la muestra durante los ensayos de esfuerzo controlado incremental, ECI, se realizó una calibración por fuerza recibida en la muestra, para lo que se utilizó la celda de carga TC-S previamente calibrada, según se describe en el inciso 3.5.

En la fig. 3.10 se muestra un esquema del consolidómetro referido. El peso de la viga o palanca y del portapesas se equilibran con un contrapeso en la parte posterior de ésta. Se entiende que el brazo puede permanecer en varias posiciones al iniciar la prueba, esta variación de posición genera un leve cambio en el brazo de palanca, debido a que la distancia horizontal que existe entre el extremo de la viga (centro del portapesas) y el centro de la muestra varía, siendo esta distancia máxima cuando el brazo esta en posición horizontal. Se consideró entonces realizar calibraciones para distintas posiciones iniciales de la viga, con las que se obtuvieron distintos valores de brazo de palanca; la posición de la viga se refirió a la distancia vertical que existe entre la arista de la base que sostiene al aparato y la misma viga. Enseguida se describe el procedimiento de calibración.

Se colocó la celda de fuerza en el marco de carga y se ajustó hasta llevarla al contacto, se adaptaron unas calzas a la celda para que el apoyo del marco sobre ésta fuera franco, se niveló y centro el sistema, se tomó la lectura de voltaje de la celda correspondiente al cero de carga, se midió la posición inicial de la viga de acuerdo a la referencia anteriormente citada, posteriormente se dio una secuencia de incrementos y decrementos de carga al portapesas, tomando para cada carga aplicada la correspondiente lectura de la celda.

Con los datos registrados, se obtuvieron gráficas de carga en portapesas (que se conocieron mediante las lecturas de la celda de carga y la calibración correspondiente) contra carga recibida en la muestra. Estas relaciones son lineales y su pendiente corresponde al brazo de palanca para la posición inicial de la viga, es decir al número de veces que se debe multiplicar la carga que se coloca en el portapesas para conocer la carga sobre la muestra. En la fig. 3.13 se muestra la gráfica de calibración para la posición inicial de 3.9 cm.

Se realizaron 8 calibraciones para distintas posiciones iniciales de la viga, con las que se calcularon 8 brazos de palanca; con estos datos se obtuvo finalmente una gráfica de brazo de palanca contra la posición inicial, tal como se aprecia en la fig. 3.14; se observa que el brazo de palanca varía entre 9.39 y 9.72 aproximadamente, de manera que se debe tomar en cuenta la posición inicial de la viga al iniciar el ensayo de esfuerzo controlado incremental, ECI, con la finalidad de establecer que brazo de palanca se debe emplear en los cálculos.

3.8.3 Observaciones

La reducción de los registros de los ensayos tradicionales de esfuerzo controlado incremental, ECI, que se presentan en el estudio comparativo del capítulo 4, se realizó tomando en cuenta la corrección por deformación del aparato de las figs. 3.11 y 3.12, así como el brazo de palanca correspondiente a la posición inicial de la viga de la fig. 3.14.

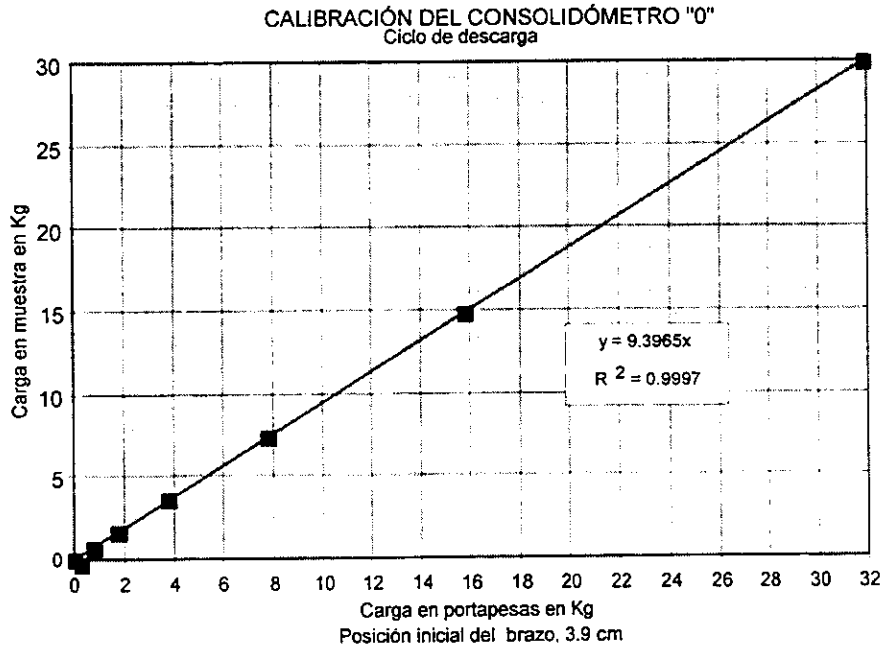


Figura 3.13 Gráfica de carga en portapesas contra carga recibida en la muestra

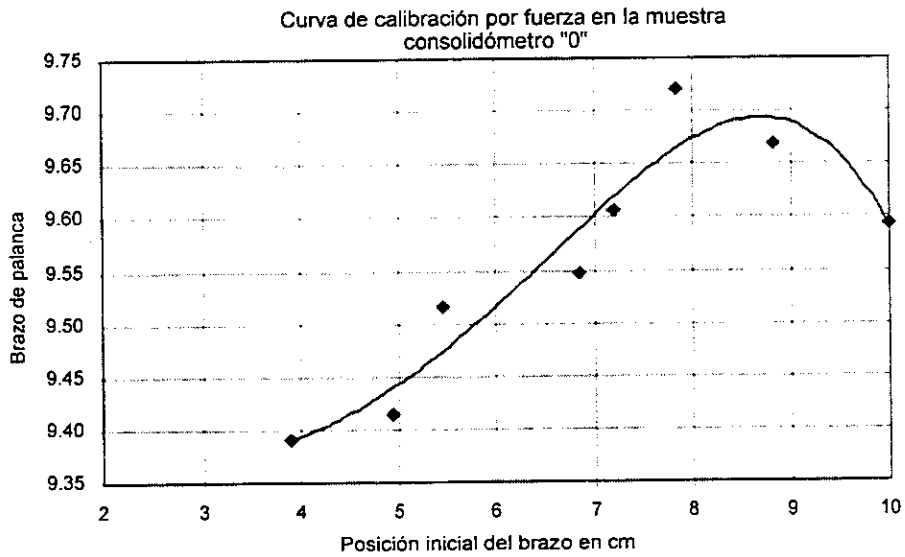


Figura 3.14 Gráfica de posición inicial de la viga contra el brazo de palanca; consolidómetro "0", Instituto de Ingeniería, UNAM

3.9 COMPENDIO

La realización de las pruebas preliminares y el laborioso proceso de calibración, permitió conocer, en primera instancia, la función aislada de cada componente del equipo prototipo VCD, para luego comprender el funcionamiento coordinado del conjunto de componentes durante un ensayo de consolidación.

Al finalizar la etapa de conocimiento y calibración del universo de componentes, se tuvo como exitoso resultado un equipo en condiciones de operación para realizar pruebas de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, en el que se garantiza precisión en la evaluación de las variables registradas por el equipo.

CAPÍTULO 4

COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE CONSOLIDACIONES CON DEFORMACIÓN CONTROLADA Y CON ESFUERZO CONTROLADO

4.1 INTRODUCCIÓN

Con la intención de evaluar la técnica de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, se llevó a cabo un programa experimental en el que se compararon resultados de cinco ensayos de consolidación con VCD, contra aquellos obtenidos en forma paralela mediante la técnica ampliamente usada de esfuerzo controlado incremental, ECI. Con el programa experimental se obtuvo un doble beneficio: por una parte se observaron ventajas y eventuales desventajas de la técnica de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, y por otro lado se definió el procedimiento de prueba para los ensayos VCD con el equipo prototipo.

En el presente capítulo, se presentan y analizan los resultados que se obtuvieron de los ensayos de consolidación efectuados con las técnicas VCD y ECI; la discusión de los mismos se enriquece con el cúmulo de experiencias adquiridas por diversos investigadores en ensayos y estudios previos. Inicialmente se describe el programa experimental, a continuación se describe en forma detallada el procedimiento para realizar los ensayos de consolidación con VCD utilizando el equipo prototipo, posteriormente se presentan y analizan los resultados de la serie de ensayos comparativos, finalmente se hacen observaciones generales.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se realizaron cinco ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, con el equipo prototipo que se describe en el capítulo 2, en muestras de cuatro diferentes tipos de suelo; dos de éstos corresponden a arcillas de la Zona del Lago de la ciudad de México, que se caracteriza por contener depósitos arcillosos muy blandos; otro suelo corresponde a una arcilla preconsolidada de la Zona de Transición de la misma ciudad de México y uno más se muestreó en depósitos limosos lacustres cercanos a Mexicali, en Baja California Norte. En la tabla 4.1 se resumen las propiedades índice de los cuatro tipos de suelo ensayados en el programa experimental, así como la procedencia y profundidad de extracción.

Todos los suelos ensayados en este programa se encontraban en estado natural debajo del nivel freático. Los especímenes se muestrearon con tubo Shelby de pared delgada, posteriormente se extrajeron del mismo (ver fig. 4.1), se protegieron con una capa de parafina y se mantuvieron en el cuarto húmedo hasta el momento del labrado de las muestras.

Las muestras se ensayaron empleando una u otra velocidad constante de deformación, R , de 0.007 mm/min ó 0.010 mm/min, que para muestras de 2.684 cm de altura corresponden a variaciones constantes de la deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$, de 0.0261% y 0.0373% por minuto respectivamente. Durante el desarrollo del capítulo, se hace mención preferentemente al término de la velocidad de deformación asociado con la variación de la deformación unitaria, $\dot{\epsilon}$, por tratarse de un parámetro mas general que el de la velocidad constante de deformación, R . La reducción de los datos de la serie de ensayos VCD se realizó con base en el método de Smith y Wahls (1969) que se expuso en el capítulo 1.

Tabla 4.1 Resumen de propiedades índice y procedencia de los suelos ensayados en el programa experimental

Suelo	Procedencia	Profundidad, m	w, %	w _L , %	PI, %	ECI	VCD
Puente Impulsora	Av. Central y Av. de las Zapatas, nororiente de la cd. de México	1.5	174	182	126	1	2
La Viga	Eje 2 Ote. y Prolongación Eugenia, suroriente de la cd. de México	25.0	74	-	-	1	1
Hospital Juárez	Zona centro de la cd. de México	11.7	268	399	277	1	1
Mexicali	Laguna Salada, Mexicali, BCN	0.3	32	29	4	1	1

1 w_L, límite líquido determinado con la Copa de Casagrande

2 w, contenido natural de agua

3 PI, índice de plasticidad

Cuatro ensayos ECI se practicaron sobre muestras de los cuatro tipos de suelo anteriormente descritos, aplicando relaciones de incremento de esfuerzo unitarias cada 24 horas. Tanto el procedimiento de prueba como el análisis de los resultados de éstos ensayos, se realizaron según recomendaciones del método estándar ASTM D2435 (1990).

El anillo del consolidómetro que se utilizó en los ensayos tradicionales ECI, fue del tipo flotante, por lo que se permitió el drenaje por ambas caras del espécimen; el área de la sección transversal fue de 50.25 cm² (misma área de especímenes VCD) y altura de 1.986 cm. Al igual que en los ensayos VCD, en los ensayos ECI se utilizaron papeles filtro en ambas piedras porosas.

El estudio comparativo de los resultados de la serie de ensayos VCD y ECI se divide en cuatro aspectos: curvas de compresibilidad, coeficiente de consolidación, coeficiente de permeabilidad y tiempos de ensaye. Debido a la importancia que tiene el desarrollo de la presión de poro y la velocidad de deformación en los ensayos VCD, se discuten estos aspectos antes de iniciar el análisis comparativo.

4.5 PROCEDIMIENTO DE PRUEBA DE LOS ENSAYES VCD

Los ensayos de consolidación con VCD, se realizaron con el equipo prototipo que se describe en el capítulo 2. El labrado de las muestras se realizó con la ayuda de un torno simple, procediendo en la misma forma que para las pruebas convencionales. En la fig. 4.2 se muestra una vista del proceso de labrado; obsérvense el torno y las herramientas de corte. Las muestras se colocaron sobre el anillo del prototipo y éste a su vez se fijó al torno de labrado; se hicieron labrados perimétricos de 2 mm de anchura aproximadamente, comenzando por la base de la muestra y finalizando hasta que ésta penetrara totalmente en el anillo. La herramienta de labrado consistió de una espátula común hecha de acero inoxidable que se torneó con las dimensiones adecuadas a la geometría del anillo y a la anchura de corte. El enrase de la muestra se hizo utilizando un alambre tenso en un arco de segueta, teniendo especial cuidado en el enrase de la cara inferior para evitar remoldeos que pudieran afectar los resultados de compresibilidad así como las lecturas de presión de poro que se registran precisamente en esa cara. El suelo adyacente se utilizó para obtener la densidad de

sólidos, el contenido inicial de agua y las propiedades índice del suelo. Una vez que se terminó el labrado, se pesaron muestra y anillo transcribiendo el dato a la hoja de registro correspondiente.



Figura 4.1 Extracción del tubo Shelby de las muestras de arcilla de Puente Impulsora

Previamente al labrado de la muestra, se preparó el equipo prototipo VCD, para lo que se siguió una rigurosa metodología. Debe destacarse la importancia de seguir el procedimiento que a continuación se detalla, debido a que un buen montaje de prueba, minimizará dificultades de operación que se presentaron en ensayos previos; así mismo, se pueden prevenir eventos que hagan susceptibles de duda a los resultados del ensayo VCD.



Figura 4.2 *Proceso de labrado y herramientas de corte para ensayos VCD*

En primera instancia se fijó la celda de fuerza a la viga de reacción de la máquina de compresión, y a la primera se fijó la columna de carga del consolidómetro; luego se centró y fijó el pedestal del consolidómetro al plato de la máquina de compresión.

Se saturó el transductor de presión de poro para lo que se escurrió agua desaerada con una jeringa por la pared interior del dispositivo, teniendo especial cuidado de no dañar el diafragma del mismo. Posteriormente, se colocó teflón a la rosca del transductor y se atornilló a la base del consolidómetro, con lo que se aseguró el sellado total de la unión. En la fig. 4.3 se muestra el proceso de saturación del transductor de presión de poro y en la fig. 4.4 se ilustra el dispositivo una vez colocado dentro del pedestal y bajo la base del consolidómetro prototipo.

A continuación, se saturó el conducto de la base del consolidómetro que comunica al transductor de presión de poro con la cara inferior de la muestra, para lo que se hizo circular agua desaerada en su interior, manteniendo la válvula de la línea de saturación abierta a la vez que se inclinaba la base del consolidómetro, tal como se ilustra en la fig. 4.5. Lo anterior con la finalidad de que el agua expulsase el aire de abajo hacia arriba, evitando con esto dejar burbujas atrapadas en el conducto. Luego se cerró la válvula de la línea de saturación y se fijó la base del consolidómetro al pedestal por medio de cuatro tornillos.

Es preciso señalar que la etapa de montaje descrita en los párrafos anteriores, debe hacerse con especial cuidado, toda vez que con el sistema mal saturado se carecerá del registro de la presión de poro en la base, caso que se presentó en un ensaye previo y que puso en evidencia la importancia del proceso de saturación.

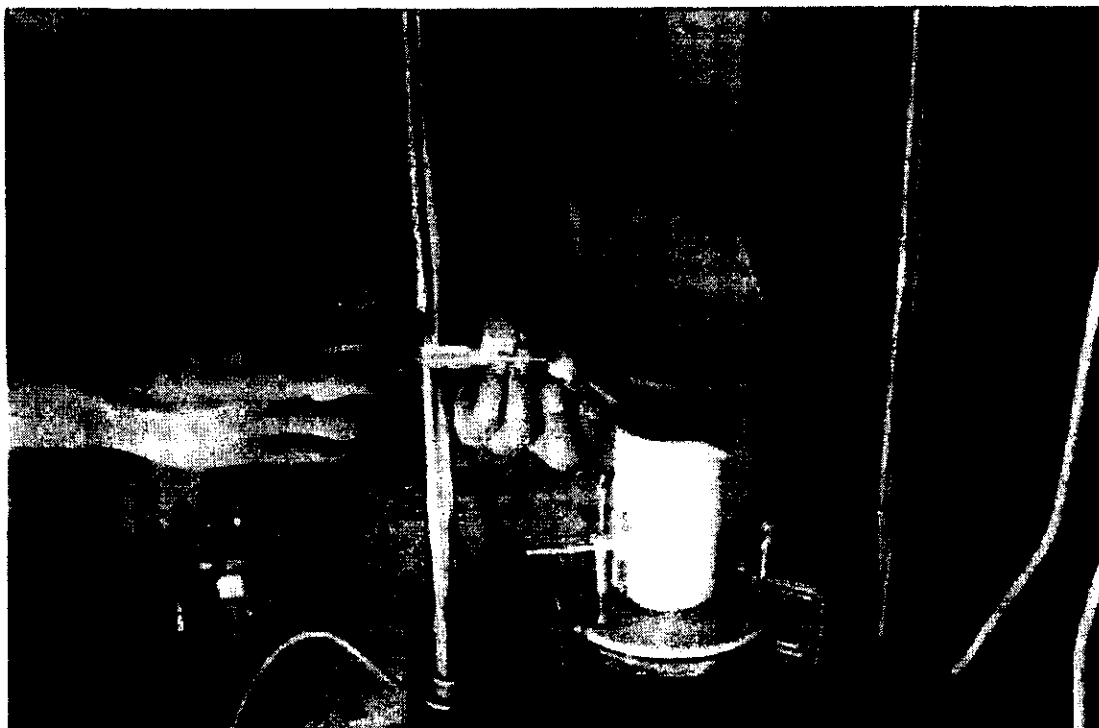


Figura 4.3 Proceso de saturación del transductor de presión de poro para ensayos VCD



Figura 4.4 Colocación del transductor de presión de poro bajo la base del consolidómetro prototipo



Figura 4.5 *Proceso de saturación del conducto en la base del consolidómetro*

Se colocó la piedra porosa inferior previamente saturada sobre la base del consolidómetro. Tanto la piedra porosa inferior como la que se encuentra en la columna de carga, se hirvieron antes de cada ensaye y se mantuvieron en agua desaerada hasta su utilización; entonces, se dispuso la camisa de lucita sobre la columna de carga, tal como se ilustra en la fig. 4.6; la camisa de lucita debe colocarse en esta etapa para evitar maniobrar con ella una vez que se tiene montada la muestra; así mismo, debe conectarse el sistema de adquisición de datos pues es necesario monitorear las lecturas de los transductores como a continuación se describe.

Teniendo la muestra labrada dentro del anillo, se colocó sobre la base del consolidómetro, tal como se ilustra en la fig. 4.7, evitando en todo momento deslizarla sobre la base. Posteriormente se unió y selló el anillo a la base del consolidómetro para lo que se utilizaron cuatro tornillos y un empaque tipo arosello, tal como se describe en el capítulo 2; lo anterior para evitar cualquier fuga de presión de poro en la unión anillo-base. Con la finalidad de no dejar aire atrapado entre la base del consolidómetro y la muestra, se abrió la válvula simultáneamente a la colocación de la muestra, con lo que se logró un pequeño flujo de agua a través de la piedra porosa inferior. Una vez que se colocó la muestra en el prototipo, la válvula se mantuvo abierta para permitir que el espécimen absorbiera el agua necesaria si ese fuere el caso.

Se niveló la columna de carga inicialmente colocada, para lo que se ajustaron las tuercas de la viga de reacción de la máquina de compresión hasta alinearla perfectamente con el anillo; esto se hizo con la precisión debida para que el émbolo no rozará con la pared interior del anillo durante el desarrollo de la prueba.

Se elevó el plato de la máquina de compresión hasta llevar la cara superior de la muestra al contacto con la columna de carga; para ello se observó en el monitor la lectura estable de la celda de fuerza y se consideró el contacto hasta el momento que se registró una variación en ésta; se aplicó entonces una presión inicial de

0.05 kg/cm² aproximadamente, con la finalidad de lograr contacto pleno en toda el área del espécimen además de evitar una posible expansión al inundar la muestra, de manera similar a lo que se realiza en los ensayos convencionales de esfuerzo controlado incremental, ECI. Una vez hecho lo anterior, se registró la presión inicial de contacto en la hoja de reporte.

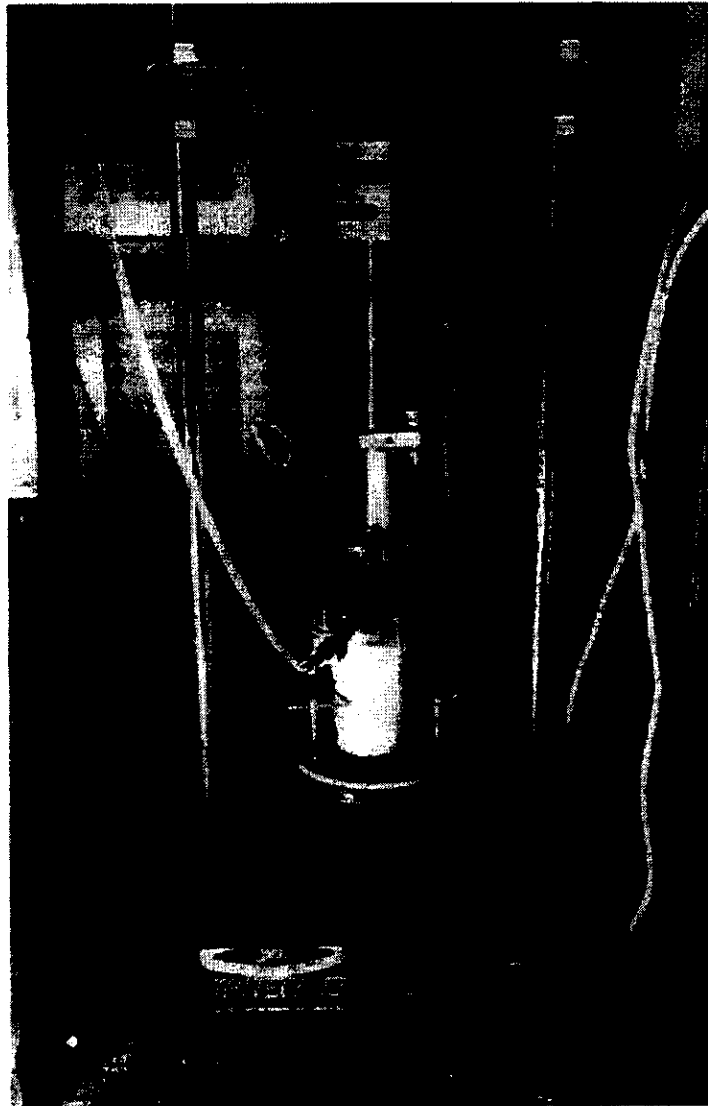


Figura 4.6 Preparación de la camisa de lucita sobre la columna de carga del consolidómetro

A continuación, se colocó el transductor de desplazamiento con la suficiente carrera para cubrir todo el intervalo de deformación de la muestra, para lo que se consideró la posición del centro eléctrico del dispositivo con la intención de trabajar en el rango lineal de la calibración (capítulo 3); posteriormente se registró la lectura inicial del transductor de desplazamiento en la hoja de reporte.

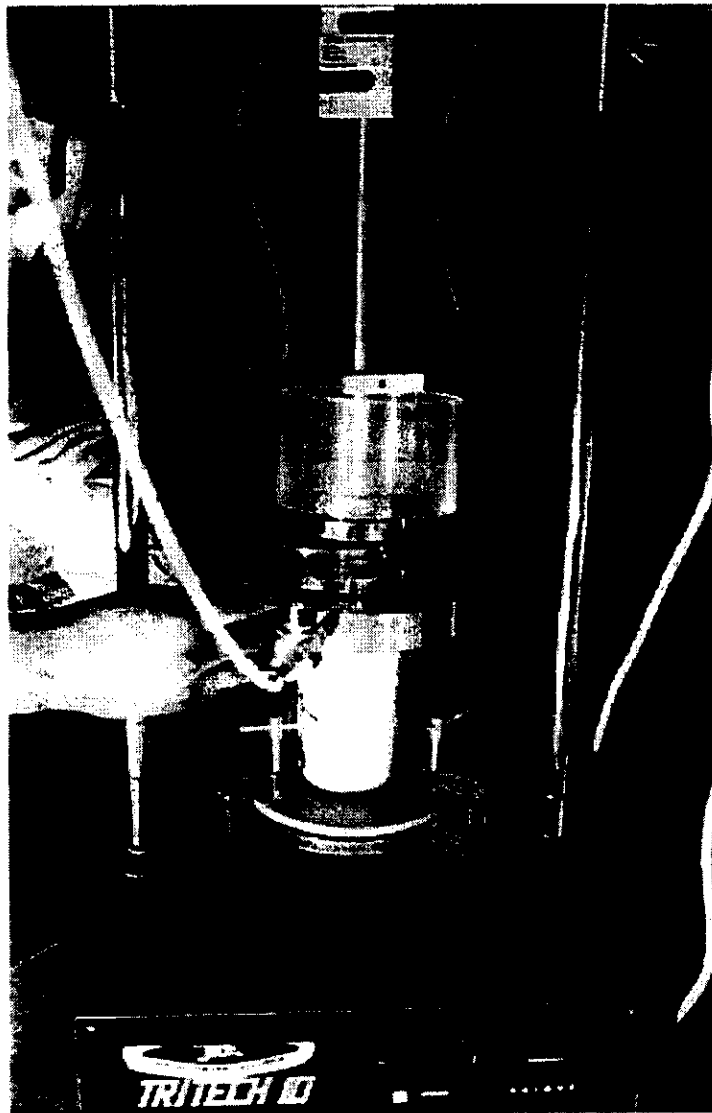


Figura 4.7 Colocación de la muestra sobre la base del consolidómetro

Una vez hecho lo anterior, se inundó la muestra vertiendo agua desaerada dentro de la camisa de lucita. La muestra se mantuvo inundada por una hora o un par antes de iniciar el ensaye y durante todo el desarrollo del mismo. Es de destacarse que en el estado actual del equipo no se puede asegurar la saturación de la muestra, ya que no es posible aplicar contrapresión como lo indica la norma ASTM D4186 (1989); sin embargo, este problema no es privativo de esta técnica y no influye en la comparación de resultados con las pruebas convencionales de esfuerzo controlado incremental, ECI, toda vez que los equipos para éstas últimas tampoco disponen de un sistema para asegurar la saturación de la muestra; por otra parte, debe considerarse que las pruebas de consolidación, cualquiera que sea la técnica empleada, se realizan preferentemente sobre especímenes por abajo del NAF, es decir que teóricamente se encuentran en su condición saturada.

Dispuesto el aparato de prueba y el sistema de adquisición de datos del equipo prototipo, se seleccionaron del menú principal del programa de adquisición, DAQWare, los canales a monitorear (0, 1 y 2) y

se asignaron los nombres respectivos, la frecuencia de muestreo y el número de muestras a promediar, tal como se describe en el capítulo 2. Del tablero de control de la máquina de compresión se seleccionó la velocidad de deformación, con lo que se tenían todas las condiciones para iniciar el ensaye.

Se activaron simultáneamente la máquina de compresión y el sistema de adquisición de datos, con lo que la muestra comenzó a deformarse con velocidad constante y de igual forma se inició el registro automático de la presión de poro en la base, la fuerza aplicada y la deformación experimentada en la muestra. En la fig. 4.8 se muestra una vista del equipo prototipo durante un ensaye VCD.



Figura 4.8 Vista del equipo VCD durante un ensaye

Al alcanzar el valor máximo de carga o de deformación deseado (las lecturas de voltaje de los tres transductores se pueden observar en todo momento a través de la pantalla, con lo que se puede estimar el valor actuante de presión, fuerza y desplazamiento), se detuvo la máquina de compresión y simultáneamente se

ordenó al programa DAQWare detener el registro de datos, con ello se concluyó la labor experimental del ensaye. A continuación se grabó el archivo de datos con el nombre distintivo del ensaye.

En algunos ensayes, se realizó un ciclo de descarga con una velocidad generalmente mayor a la que se utilizó para la compresión; en estos casos el ensaye se detuvo hasta que la lectura de la celda de fuerza indicara cero de carga o bien cuando la presión de poro en la base tomaba valores negativos. Igualmente se grabó un archivo de datos con los registros del ciclo de descarga (no se presentan los resultados de las descargas).

Al terminar la labor experimental, el consolidómetro se desensambló para limpiar las partes, las piedras porosas se hirvieron, la muestra se pesó junto con el anillo para posteriormente extraerla y secarla en el horno de convección durante 24 horas. Una vez secada la muestra, se obtuvo el contenido natural de agua del espécimen así como el contenido de agua del mismo después del ensaye.

Finalmente, se importó el archivo de datos a la hoja de cálculo que se describe en el capítulo 2, con lo que se obtuvieron los parámetros de compresibilidad, consolidación y permeabilidad del suelo ensayado (para obtener tales parámetros es indispensable conocer la densidad de sólidos y el contenido natural de agua de la muestra).

4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

En el presente inciso, se describen los resultados del programa experimental en el que se realizaron cinco ensayes de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, empleando variaciones constantes de deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$, de 0.0261% y 0.0373% por minuto. Con la intención de verificar y comparar los resultados que se obtuvieron al utilizar el prototipo VCD, se realizó una serie de ensayes con la técnica convencional de esfuerzo controlado incremental, ECI, en muestras contiguas del mismo suelo. Inicialmente se discute el efecto que tiene el desarrollo de la presión de poro y la velocidad de deformación en los ensayes VCD, y se describen los comportamientos observados; posteriormente se describen, comparan y discuten los resultados de compresibilidad, consolidación, permeabilidad y los tiempos de ensaye requeridos para ambas técnicas.

4.4.1 Efecto de la presión de poro en los ensayes VCD

Una de las variables en la que se ha puesto mayor atención desde la aparición de los ensayes VCD, es la presión de poro que se genera en la base de los especímenes, u_b , cuando un tipo particular de suelo se somete a diferentes velocidades de deformación; tal preocupación se debe a que esta variable parece manifestar, por sí misma, el intervalo en que es aplicable la teoría de la consolidación con velocidad constante de deformación. En efecto, en la medida en que crece el cociente que forman la presión de poro en la base y el esfuerzo total aplicado, u_b/p , (ambas cantidades se miden directamente durante el ensaye VCD mediante los transductores) las suposiciones y simplificaciones de la teoría de Smith y Wahls (1969) pierden sustentamiento; esto es, que la variación lineal de la relación de vacíos con la profundidad en el espécimen que estos autores suponen, dista de ser así conforme aumenta la variación del esfuerzo efectivo con la profundidad; de la misma forma, la consideración del valor medio de la relación de vacíos en la muestra para resolver la ec 1.3, dista de ser real; ambos casos se reflejan directamente mediante el valor del cociente u_b/p . Lo anterior se comprende fácilmente si se observa la fig. 1.4 del capítulo 1.

En la literatura respectiva, se advierte la opinión generalizada sobre la necesidad de mantener dentro de cierto intervalo los valores que pudiese tomar la relación u_b/p durante un ensaye VCD; así se tiene que Smith y Wahls (1969) señalan que con valores menores al 50% se tienen resultados similares a aquellos obtenidos con la técnica ECI cuando se ensayan ciertos tipos de arcillas; Sällfors (1975), recomienda que el cociente u_b/p no rebase el 15%, mientras que la norma ASTM D4186 (1989) señala que este cociente debe mantenerse entre 3% y 30%. De todo lo expuesto surgen naturalmente las preguntas: ¿cuál es valor adecuado para el límite superior del cociente u_b/p ? y ¿qué efecto tiene en los resultados si durante el ensaye VCD se rebasa dicho límite?; las respuestas a tales cuestiones se basan en la experiencia acumulada de numerosos ensayos y estudios previos realizados por diversos investigadores. En general se puede afirmar que con valores menores al 30% se tendrán datos similares a los que se obtendrían de ensayos con la técnica tradicional ECI; si este límite se rebasa el suelo muestra una aparente disminución de compresibilidad, es decir, la forma de la curva esfuerzo efectivo-relación de vacíos, varía de tal suerte que de ella se obtiene una carga de preconsolidación mayor. En realidad, el límite superior de la relación u_b/p puede variar de suelo a suelo, de tal forma que en suelos muy compresibles y poco permeables, se deben cumplir relaciones menores al 15% y se admiten valores mayores para suelos más duros. Para arcillas como la de la ciudad de México, de alta compresibilidad, se admite como límite del cociente u_b/p el que recomienda Sällfors (1975) igual al 15%.

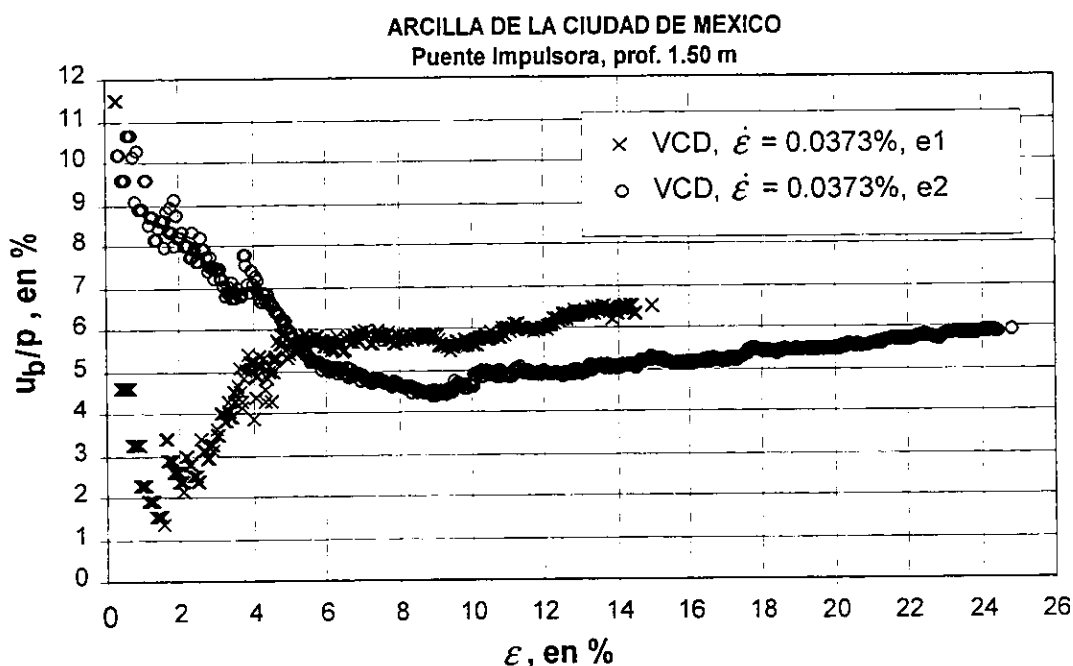


Figura 4.9 Variación del cociente u_b/p contra la deformación unitaria, en ensayos VCD de la arcilla de Puente Impulsora

De las figs. 4.9 a 4.12, se muestran las gráficas de la variación del cociente u_b/p contra la deformación unitaria, ϵ , registradas en los cinco ensayos VCD que se realizaron para este estudio. Las formas de las gráficas u_b/p contra ϵ de todos los ensayos excepto uno (Hospital Juárez, fig. 4.12), son muy similares entre sí, esto es que los valores máximos del cociente u_b/p , los cuales nunca fueron mayores al 13%, ocurrieron al inicio de la prueba y siempre fueron descendentes hasta que se estabilizaron en un valor mínimo. El que los valores máximos de u_b/p ocurrieran al inicio de la prueba obedece a que en los suelos saturados, teóricamente

para el primer instante, la presión aplicada, p , debería ser igual a la presión de poro en cualquier punto del espécimen, incluyendo a la presión de poro en la base, u_b , lo que equivale a tener $u_b/p=100\%$; por las condiciones propias del equipo, las primeras lecturas de presión y fuerza se toman cuando ha transcurrido un minuto, por lo que es muy razonable que para entonces el cociente u_b/p tuviese valores altos pero menores al 100%; además, el valor ideal del 100% nunca se cumple por la inevitable fricción existente entre el suelo y el anillo. En los párrafos siguientes se describen los comportamientos de la presión de poro que exhibieron cada uno de los ensayos VCD.

En la fig. 4.9 se ilustran las variaciones u_b/p contra la deformación unitaria, ϵ , de dos ensayos VCD denominados ensaye1 y ensaye2, que se realizaron sobre especímenes de arcilla del puente Impulsora (ver tabla 4.1), en los que se empleó una variación constante de la deformación unitaria, $\dot{\epsilon}$, igual a 0.0373% por minuto ($R=0.01$ mm/min). De la gráfica, se puede apreciar que se presentan diferencias importantes al inicio de los ensayos, en el intervalo de 0.2% a 5% de ϵ , en donde ensaye2 desarrolló mayor presión de poro mostrando una pendiente más o menos constante con valores del cociente u_b/p siempre descendentes hasta alcanzar un mínimo de 5% ($\pm 1\%$), mientras que la gráfica de ensaye1 llega rápidamente a un valor de u_b/p mínimo cercano al 1%, para después subir a un máximo de 6% y así se mantiene hasta el final del ensaye. Fuera del intervalo inicial, ambas gráficas presentan una tendencia francamente horizontal con diferencias mínimas entre sí de aproximadamente el 1%. Debe notarse que por tratarse de ensayos paralelos bajo las mismas condiciones de velocidad de deformación, R , las gráficas de ensaye1 y ensaye2 deberían ser prácticamente las mismas. No está completamente clara la razón de las diferencias del comportamiento observadas en ambos ensayos, aunque pudieran deberse a que las muestras no eran completamente homogéneas, pues al extraerlas del tubo Shelby se observó una veta de un suelo poco más claro que el resto, en el sentido longitudinal del tubo. Aunque los valores u_b/p que se alcanzaron en ensaye1 y ensaye2 estuvieron dentro del intervalo recomendado por Sällfors (1975), es decir menores al 15%, las diferencias iniciales fueron suficientes para repercutir en la forma de la curva de compresibilidad (fig. 4.15), y en menor medida en la permeabilidad y consolidación (figs. 4.19 y 4.23), tal como se explica en secciones posteriores a ésta.

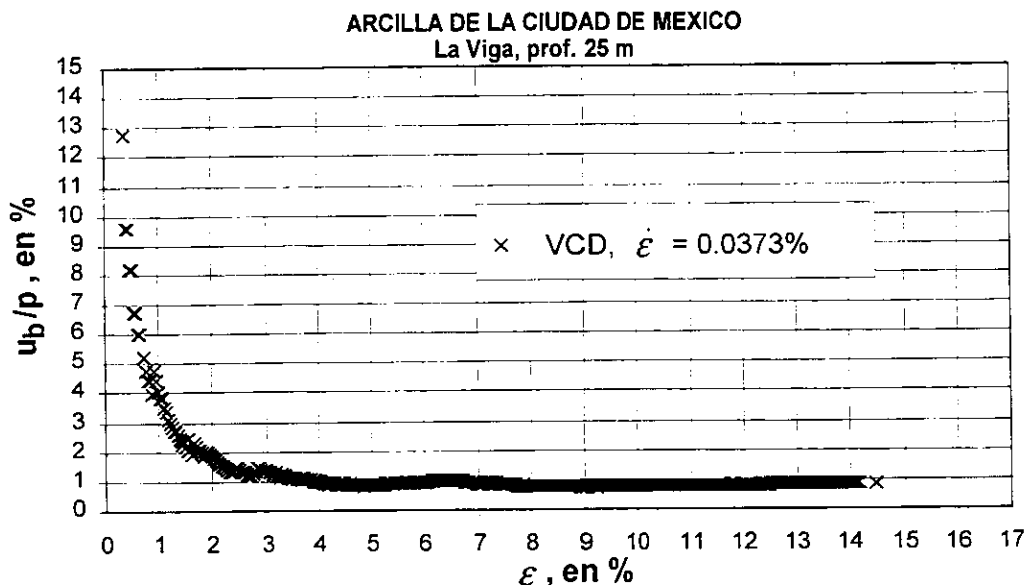


Figura 4.10 Variación del cociente u_b/p contra la deformación unitaria, en ensayo VCD de La Viga

En la fig. 4.10, se ilustran las variaciones u_b/p contra la deformación unitaria, ϵ , de una muestra de arcilla procedente de la Viga, en la ciudad de México, que se ensayó con $\dot{\epsilon}$ igual a 0.0373% por minuto ($R=0.01$ mm/min). Al igual que en ensaye1 y ensaye2, los valores máximos de u_b/p para este ensaye ocurrieron al inicio de la prueba (de 0% a 0.5% de ϵ). Una vez que se alcanzó el 3% de ϵ , en la rama de compresión virgen, el cociente llegó a un valor mínimo cercano al 1% y se mantuvo así hasta el final del ensaye. Es notable que este tipo de arcilla de la Zona de Transición, menos compresible que la de Puente Impulsora que se analizó inicialmente, con un contenido de agua natural muy por debajo del que presentaron los especímenes de ensaye1 y ensaye2, desarrollara menores valores del cociente u_b/p que aquéllos, aun cuando se ensayaron con la misma velocidad de deformación. Debido al reducido número de ensayos que se analizan en este programa experimental, sería muy aventurado emitir cualquier conclusión al respecto, aunque puede intuirse que la compresibilidad del suelo es un factor de influencia en los valores que adopte el cociente u_b/p .

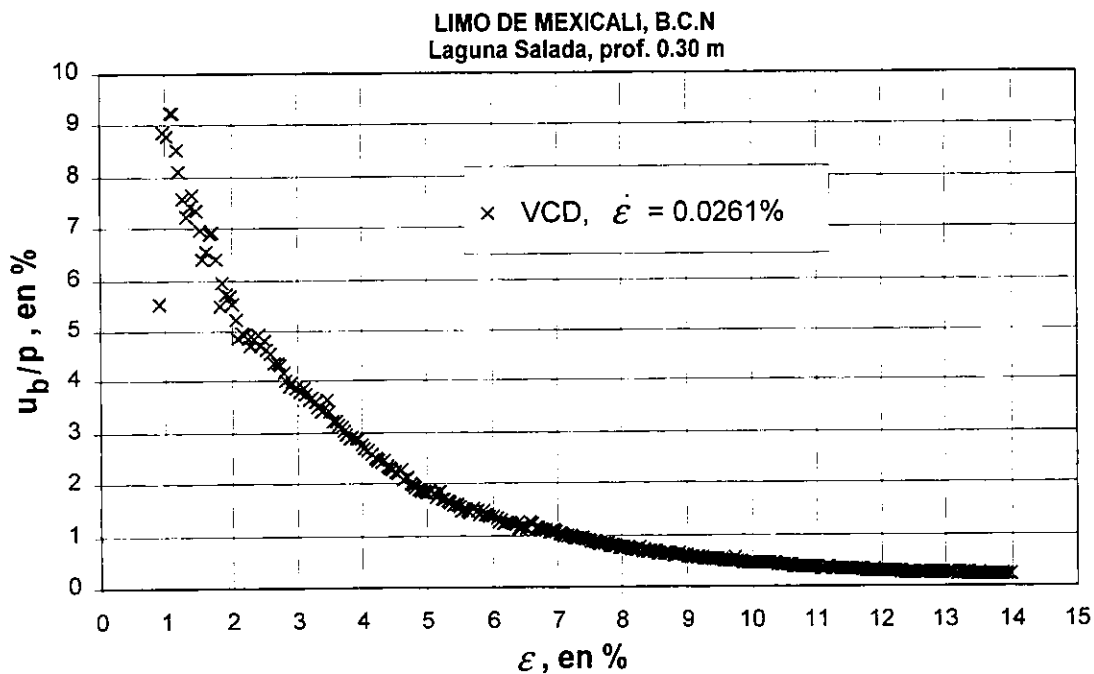


Figura 4.11 Variación del cociente u_b/p contra la deformación unitaria, en ensaye VCD del Limo de Mexicali

El comportamiento de u_b/p contra ϵ para el limo de Mexicali, que se ensayó con $\dot{\epsilon}$ igual a 0.0261% por minuto ($R=0.007$ mm/min), se presenta en la fig. 4.11. La forma de la gráfica es muy similar a la del ensaye de La Viga (fig. 4.10), con valores del cociente u_b/p máximos al inicio de la prueba que disminuyen paulatinamente hacia el final. Más allá de la mitad del ensaye ($\epsilon=7\%$), los valores de u_b/p fueron siempre menores al 1%. Se destacan los valores tan bajos del cociente u_b/p , quizás motivados por la velocidad de deformación que para este ensaye fue menor a los anteriormente analizados. De lo anterior, se observa que la velocidad de deformación, R , o lo que es semejante, la variación de la deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$, merece una atención especial por su efecto en la presión de poro. Debido a los alcances del programa experimental, no se realizaron ensayos sobre un mismo tipo de suelo con diferentes velocidades, sin embargo en ensayos VCD previos, se ha observado que para un mismo tipo de suelo, mayores velocidades de

deformación producen mayores presiones de poro en el espécimen; tal hecho se discute en el subinciso siguiente.

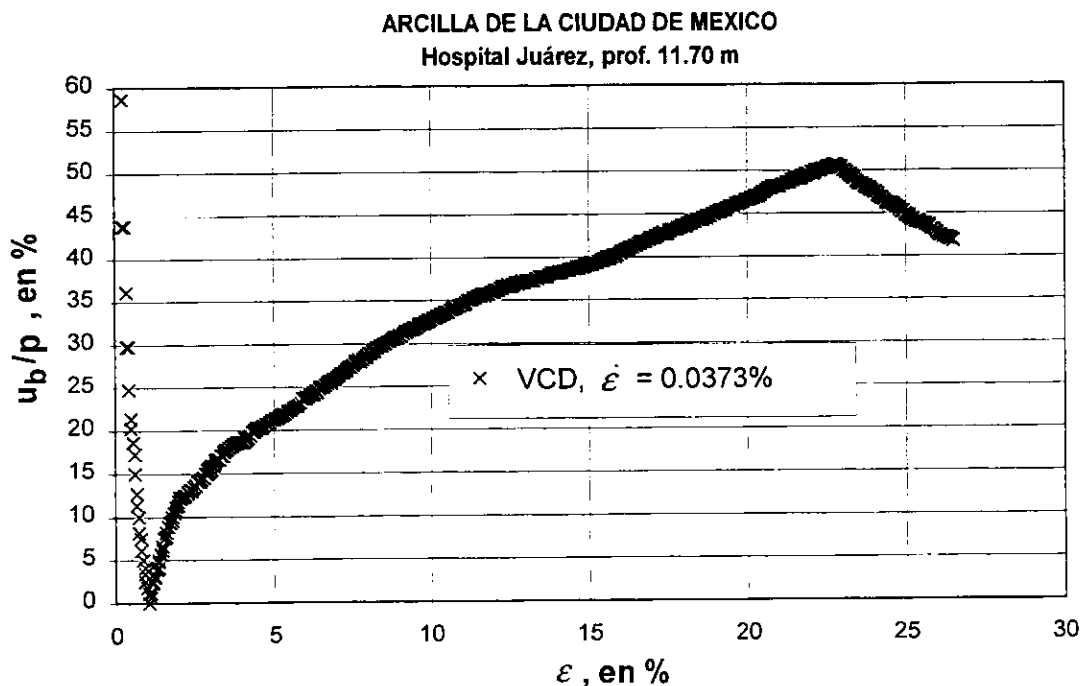


Figura 4.12 Variación del cociente u_b/p contra la deformación unitaria, en ensaye VCD de la arcilla de Hospital Juárez

En la fig. 4.12, se muestra la gráfica de u_b/p contra la deformación unitaria para el ensaye realizado sobre la arcilla suave del Hospital Juárez de la ciudad de México, con una variación de la deformación unitaria con el tiempo igual a 0.0373% por minuto ($R=0.01$ mm/min). La forma de esta gráfica es muy distinta a la de los cuatro ensayos hasta ahora analizados. De la fig. 4.12 se observa que muy al inicio de la prueba se desarrollaron valores muy altos del cociente u_b/p cercanos al 60%, posteriormente descendieron rápidamente casi hasta el 0% para después incrementarse en forma constante sobrepasando valores del 50%, rebasando incluso el límite de capacidad del canal del transdutor de presión; al analizar los datos del ensaye, se observó que al primer minuto de prueba se produjo una presión de poro alta (0.02 kg/cm²) que se disipó rápidamente, mientras que la celda de fuerza registró un incremento muy suave para las deformaciones unitarias iniciales, por lo que el cociente u_b/p descendió a valores muy cercanos al cero. Como se menciona al inicio del inciso, el valor máximo que parece aceptarse es del 15% según Sällfors (1975), y del 30% según la norma ASTM D4186 (1989), por lo que los resultados de este ensaye deben analizarse con cautela. El efecto de tan elevadas relaciones u_b/p , influyó en la compresibilidad del suelo (fig. 4.18), tal como se discute con detalle en una sección posterior. Debe acotarse que con una velocidad constante de deformación menor a la que se utilizó para el ensaye, seguramente se hubieran desarrollado menores presiones de poro y por tanto menores valores del cociente u_b/p .

4.4.2 Efecto de la velocidad de deformación en los ensayos VCD

En las últimas tres décadas, se han realizado numerosos ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, en distintas partes del mundo, de los cuales se ha obtenido valiosa información sobre la respuesta esfuerzo-deformación-velocidad de deformación de los suelos, en particular de las arcillas suaves. En la mayor parte de los estudios que se han hecho sobre ensayos VCD, existe consenso sobre la influencia que tiene la velocidad de deformación en la curva de compresibilidad de las arcillas; así se tiene que para un suelo en particular, a una deformación unitaria dada, ϵ , entre mayor sea la variación de la deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$, mayor será el esfuerzo efectivo, p' , lo que se refleja en una menor compresibilidad de la muestra.

La influencia de la velocidad de deformación a la compresibilidad de las arcillas puede representarse en la forma del modelo reológico de Leroueil, (1988): $R(\sigma, \epsilon, \dot{\epsilon})=0$, lo que quiere decir que la curva de compresibilidad de un suelo particular no es única sino que depende de la variación de la deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$. En la fig. 4.13 se ilustra el comportamiento típico de las curvas de compresibilidad con la variación de la deformación unitaria con el tiempo en los ensayos VCD, obsérvese que la curva se corre consistentemente hacia la derecha conforme mayor es la velocidad de deformación, lo que quiere decir que a mayor velocidad de deformación, el suelo refleja un aparente decremento de compresibilidad.

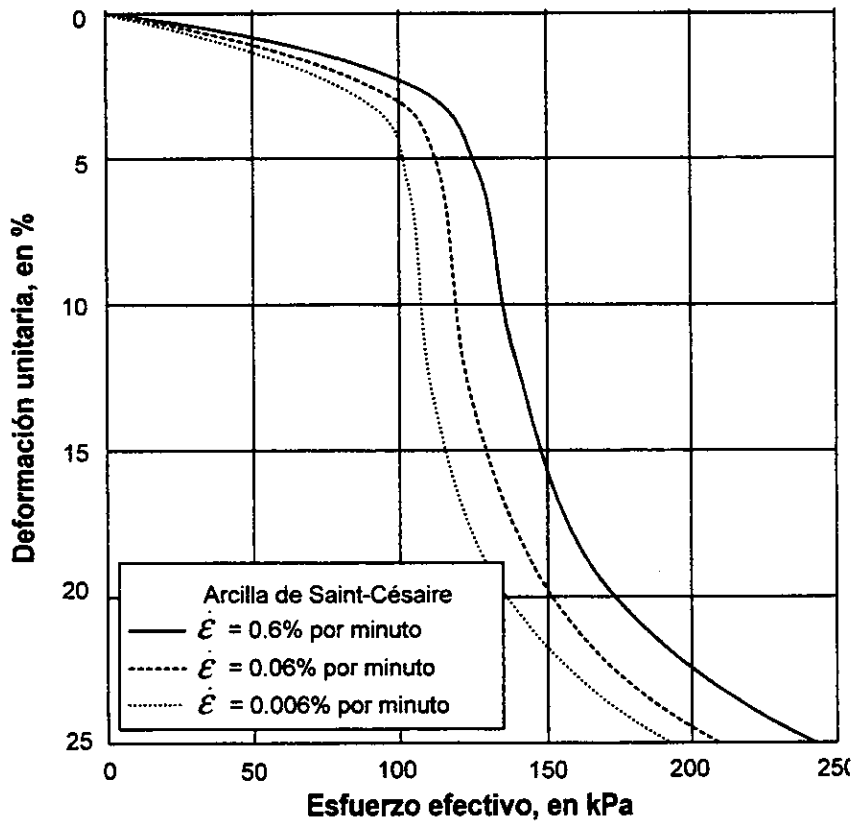


Figura 4.13 Variación típica de las curvas de compresibilidad de arcillas suaves en ensayos VCD con diferentes velocidades de deformación (Leroueil, 1988)

La dependencia de la curva de compresibilidad a la velocidad de deformación en ensayos VCD sobre un mismo suelo, fue señalada inicialmente por Crawford (1965), posteriormente por Wahls y De Godoy (1965) y después por muchos más; todos encontraron que conforme mayor es la velocidad de deformación en los ensayos VCD, el suelo refleja una aparente disminución de la compresibilidad, por lo que se obtienen cargas de preconsolidación mayores. En recientes ensayos VCD sobre muestras de arcilla de la ciudad de México, Mendoza *et al* (1996) encontraron los mismos resultados de disminución de compresibilidad.

Debe destacarse que la dependencia de las curvas de compresibilidad a la velocidad de deformación no es privativa de la técnica de consolidación VCD, pues semejante fenómeno se presenta en los tradicionales ensayos de consolidación con esfuerzo controlado incremental, ECI, cuando se varía la duración de los incrementos de esfuerzo; así tenemos que el mismo Crawford (1964) fue el primero en señalar que entre mayor sea la duración de los incrementos de esfuerzo, se obtiene mayor compresibilidad en el suelo, por tanto menor carga de preconsolidación, con lo que se ponen en evidencia las deformaciones viscoplásticas asociadas a la consolidación secundaria; este fenómeno ha sido observado y confirmado por muchos autores más (Lambe y Whitman, 1972; Larsson, 1981; Leroueil, 1988). En la fig. 4.14 se presenta el comportamiento típico de las curvas de compresibilidad en ensayos ECI cuando se varía la duración de los incrementos.

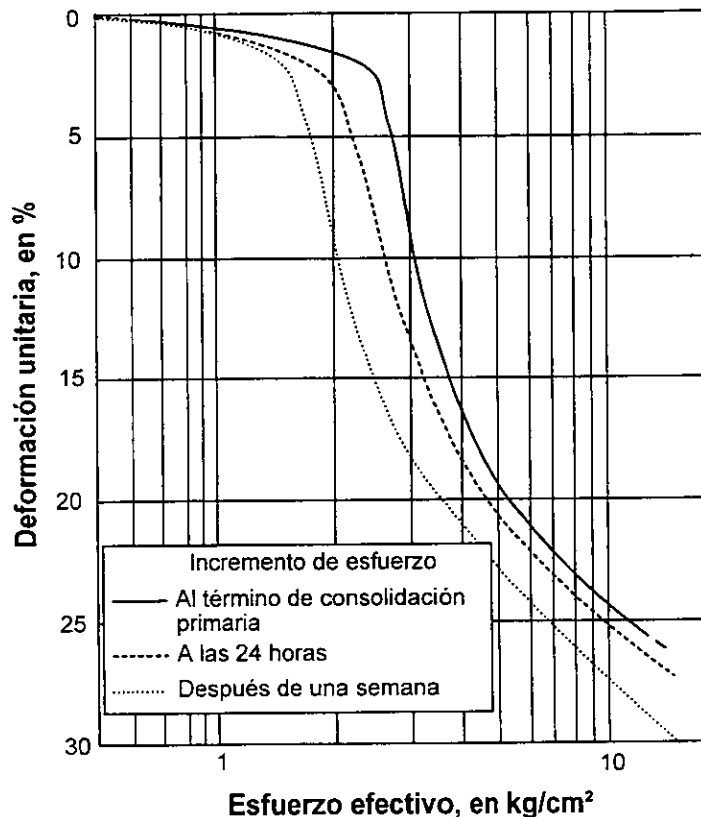


Figura 4.14 Comportamiento típico de las curvas de compresibilidad en ensayos ECI, con diferentes tiempos entre los incrementos de esfuerzo (Crawford, 1964)

Si se toma en cuenta que en los ensayos VCD el cociente u_b/p debe de mantenerse dentro de cierto intervalo, y que éste es dependiente de la variación de la deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$, el problema

se enfoca a encontrar velocidades constantes de deformación para los ensayos VCD que generen cocientes u_b/p menores al 15% ó 30% (según lo expuesto en el inciso anterior). De múltiples ensayos VCD previos, Larsson (1981) encontró que para arcillas suaves se obtienen valores de u_b/p menores al 15% si se ensayan con una variación constante de la deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$, igual a 0.012% por minuto, por lo que la recomienda como velocidad estándar; Janbu *et al* (1981) recomiendan variaciones de la deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$, para arcillas de mediana a baja plasticidad en el intervalo de 0.083% a 0.166% por minuto, que como se observa son mayores a la recomendada por Larsson (1981); Leroueil (1988) indica que las variaciones de deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$, más comunes en la práctica de ensayos VCD están entre 0.006% y 0.030% por minuto; en una publicación reciente, Sheahan (1997) indica que con $\dot{\epsilon}$ igual a 0.0016% por minuto, no se genera presión de poro en las arcillas suaves (Boston Blue Clay).

Por otra parte, existen métodos (Smith y Wahls, 1969; ASTM D4186, 1989) para estimar una velocidad constante de deformación en ensayos VCD, tal que se generen cocientes u_b/p dentro de cierto límite, para lo que se toman en cuenta las propiedades índice del suelo y con ellas se correlacionan propiedades de consolidación. En el apéndice C se presenta un ejemplo práctico del método de Smith y Wahls (1969) para estimar velocidades de deformación en ensayos VCD tales que no se rebasa un valor máximo establecido del cociente u_b/p . Debe decirse que los métodos comentados anteriormente son poco usados en la práctica, puesto que la tendencia actual para elegir una velocidad de deformación apropiada para un tipo particular de suelo, se basa en las velocidades "estandar" que se han utilizado en múltiples ensayos previos, como las que se mencionan en el párrafo anterior.

Debido a que los ensayos de consolidación con la técnica VCD son relativamente recientes, existe la preocupación de comparar y calibrar los resultados de éstos contra aquellos obtenidos mediante la ampliamente usada y conocida técnica ECI, de la que se tiene mucho mayor experiencia, es por ello que parte de la investigación que se ha realizado en los últimos años se ha enfocado a encontrar velocidades de deformación en los ensayos VCD que reproduzcan la misma curva de compresibilidad que se obtendría de un ensayo ECI. Leroueil (1988) señala que la variación de la deformación unitaria con el tiempo que tienen los ensayos ECI a las 24 horas posteriores a la colocación del incremento, es decir, en la etapa de consolidación secundaria en donde la presión de poro es muy cercana a cero, es aproximadamente igual a 0.0006% por minuto; Mesri y Feng (1986) proponen una expresión para estimar la variación de la deformación unitaria con el tiempo en ensayos VCD, con las que teóricamente se obtienen curvas iguales a las del método tradicional ECI, con incrementos de esfuerzo al término de la consolidación primaria; esta expresión involucra parámetros de compresibilidad, consolidación y permeabilidad del suelo, por lo que necesariamente debe efectuarse de manera previa un ensayo de referencia ECI, o en su defecto estimar tales parámetros. En una publicación posterior, los mismos Mesri y Feng (1992) encuentran que para arcillas suaves la velocidad de un ensayo VCD que reproduciría la misma curva de compresibilidad que la de un ensayo ECI con incrementos de esfuerzo al término de la consolidación primaria resulta igual a 0.0015% por minuto, sin embargo los autores advierten que en ensayos sobre arcillas suaves con diez veces la velocidad anterior, es decir de 0.015% por minuto, se obtienen datos confiables de los ensayos VCD con valores del cociente u_b/p entre el 3% y 15%.

Las desventajas de utilizar velocidades de deformación en los ensayos VCD para reproducir la misma curva de compresibilidad que la que se pudiera obtener de un ensayo ECI con incrementos de esfuerzo al las 24 horas o al término de la consolidación primaria, es que éstas son tan pequeñas (como las señaladas de 0.0006% ó 0.0015% por minuto) que el tiempo de ensayo se incrementaría dramáticamente en mucho más que dos días; así mismo, con semejantes velocidades de deformación, se generarían en el espécimen presiones de poro muy bajas sino es que nulas, con lo que sería prácticamente imposible valuar los coeficientes de consolidación y de permeabilidad. En vez de utilizar velocidades de deformación pequeñas en los ensayos VCD, la tendencia actual en la práctica se dirige a utilizar velocidades de deformación mayores con tiempos

típicos de ensaye de uno o dos días, y posteriormente corregir la curva de compresibilidad o la carga de preconsolidación mediante algún método (Sällfors, 1975; Mesri y Feng, 1992).

Para los ensayos VCD de este estudio, se eligieron variaciones de la deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$, iguales a 0.0261% por minuto y 0.0373% por minuto, que en muestras de 2.684 cm de espesor corresponden a velocidades constantes de deformación de 0.007 mm/min y 0.01 mm/min, con tiempos máximos de ensaye menores a un día. La elección de las velocidades de ensaye atendió a la preocupación de lograr desarrollo de presión de poro en los especímenes que pudiesen registrarse por el equipo, por lo que se eligieron mayores a la recomendada como estándar por Lärsson (1981) de 0.012% por minuto, o la de Mesri y Feng (1992) de 0.015% por minuto.

4.4.3 Curvas de compresibilidad

En las figs. 4.15 a 4.18, se presentan las curvas de compresibilidad de los ensayos que se realizaron para el programa experimental con las técnicas VCD y ECI. El valor medio del esfuerzo efectivo en los ensayos VCD se calculó con la ec. 1.20 del capítulo 1, con $b/r=1$. Para facilitar la comparación y el análisis, en cada gráfica se ilustran las curvas obtenidas con ambas técnicas correspondientes a muestras contiguas.

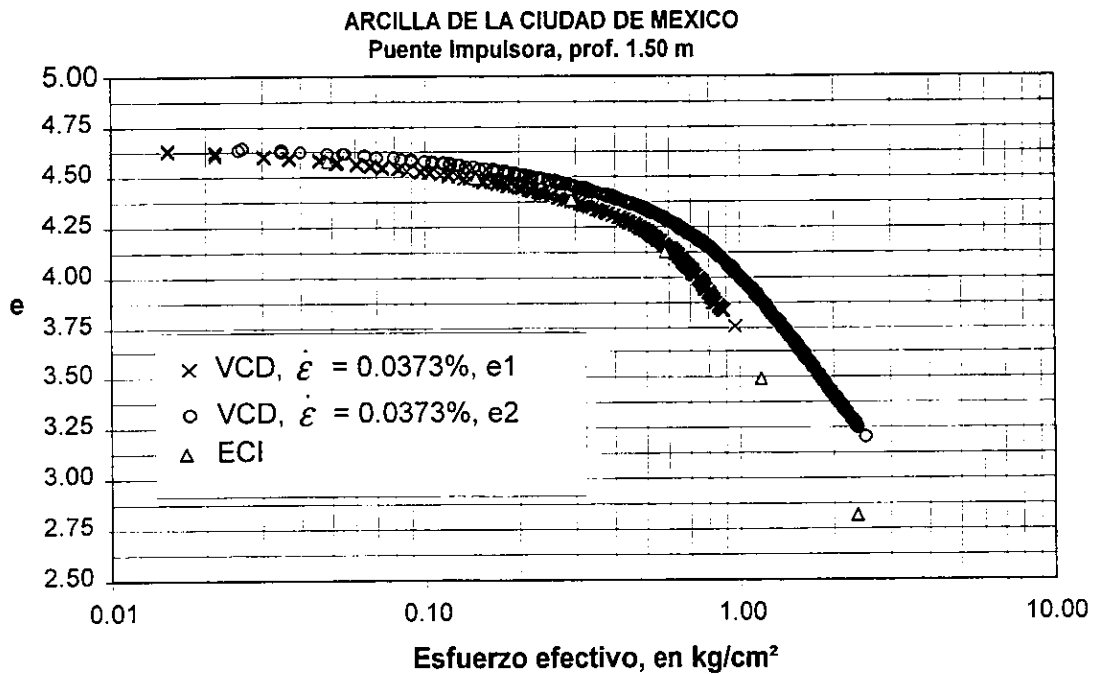


Figura 4.15 Curvas de compresibilidad determinadas con las técnicas VCD y ECI. Arcilla de la ciudad de México, zona nororiental

Las curvas de compresibilidad para la arcilla del Puente Impulsora se presentan en la fig. 4.15, en la que se distinguen dos curvas VCD obtenidas en ensayos con la misma velocidad de deformación igual a 0.0373% por minuto (ensaye1 y ensaye2), así como la curva de compresibilidad del ensaye obtenida mediante la técnica tradicional ECI. De la gráfica se observa que ambos ensayos VCD (ensaye1 y ensaye2) muestran curvas de

compresibilidad distintas, lo cual constituye un comportamiento inesperado, ya que por tratarse de ensayos en el mismo suelo con las mismas condiciones de velocidad de deformación, deberían ser muy similares las curvas de compresibilidad sino es que totalmente coincidentes. Así mismo, se observa que la curva de compresibilidad VCD de ensaye2, se abre notoriamente hacia la derecha respecto a la curva VCD de ensaye1, por lo que la carga de preconsolidación que se obtiene de la primera es mayor que la correspondiente a la curva de ensaye1. En un inciso previo de este capítulo, se señaló que se desarrollaron mayores presiones de poro al inicio de la prueba en ensaye2 que en ensaye1, por lo que los cocientes u_b/p también fueron mayores en ese intervalo (ver fig. 4.9), lo que definitivamente repercutió en un aparente decremento de la compresibilidad de ensaye2, causa por la que se abre hacia la derecha respecto a ensaye1. La razón de las diferencias entre ambas curvas VCD no es muy clara, sin embargo, pudieron deberse a la heterogeneidad de las muestras tal como se comentó con anterioridad, ya que al extraerlas del tubo Shelby se observó una veta de un suelo verde pardo que cruzaba longitudinalmente al tubo, con un cierto esbiaje, de tal suerte que aun para muestras contiguas, la veta variaba ligeramente en posición y anchura.

La curva de compresibilidad del ensayo tradicional ECI de la arcilla del Puente Impulsora que se muestra en la misma fig.4.15, es totalmente coincidente con la curva VCD de ensaye1 en la rama de recompresión, sin embargo en la rama virgen, la curva ECI está ligeramente corrida hacia la izquierda de ensaye1. Las cargas de preconsolidación que se obtienen de ensaye1 con VCD y del ensayo ECI son, para todo fin práctico, iguales y evidentemente menores que la carga de preconsolidación de ensaye2. Aunque estrictamente ensaye1 y ensaye2 se realizaron con la misma velocidad de deformación, el efecto que reflejaron ambas curvas de compresibilidad fue semejante al que tendrían ensayos VCD con velocidades de deformación distintas, en donde aparentemente ensaye2 se realizó con mayor velocidad que ensaye1, por lo que desarrolló mayor presión de poro con la consecuente disminución de compresibilidad.

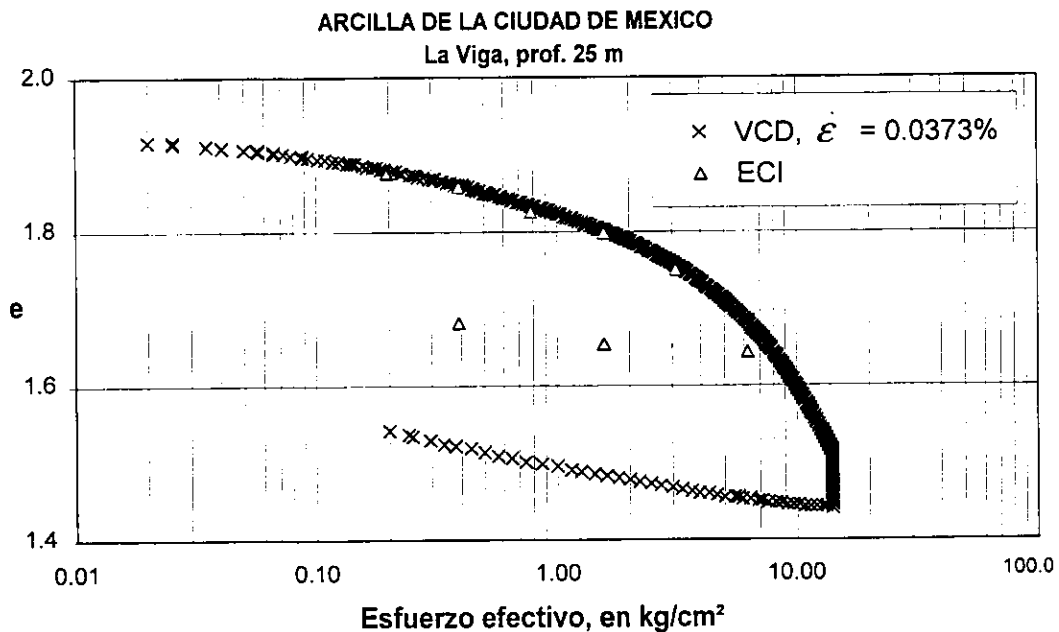


Figura 4.16 Curvas de compresibilidad determinadas con las técnicas VCD y ECI. Arcilla de la ciudad de México, zona suroriente

Las curvas de compresibilidad VCD y ECI para el suelo de La Viga, se presentan en la fig. 4.16. Es evidente la similitud que muestran ambas curvas, ya que la curva ECI prácticamente se “monta” sobre la VCD en la ramas de recompresión y virgen. Al final de la rama virgen, la curva VCD se abre ligeramente hacia la derecha, por lo que la carga de preconsolidación que se obtiene de ésta es ligeramente mayor que aquella de la técnica tradicional ECI. Debe destacarse que más allá del inicio del ensaye VCD, los cocientes u_v/p fueron del orden del 1% (ver fig. 4.10), estando muy por debajo del límite de 15% sugerido por Sällfors (1975), por lo que era de esperarse que las curvas de compresibilidad VCD y ECI fuesen muy similares entre sí. Seguramente que por ser un suelo menos compresible y con menor contenido de agua inicial que la arcilla del Puente Impulsora, los cocientes u_v/p del suelo de La Viga fueron menores que aquellos que se generaron en ensaye1 y ensaye2 (fig. 4.9) a pesar de que se ensayaron con la misma variación de la deformación unitaria con el tiempo, $\dot{\epsilon}$, por lo que quizás se hubiese justificado, para el suelo de La Viga, la selección de valores mayores de $\dot{\epsilon}$, sin que con ello se obtuviera una curva de compresibilidad VCD muy distinta a la que se muestra en la fig. 4.16, y en cambio se hubiese reducido el tiempo de ensaye.

Es conveniente aclarar que la parte plana de la curva de compresibilidad de La Viga, que se observa al final del ensaye, se debió a que se rebasó la capacidad de la celda de fuerza y no a un proceder anómalo del suelo.

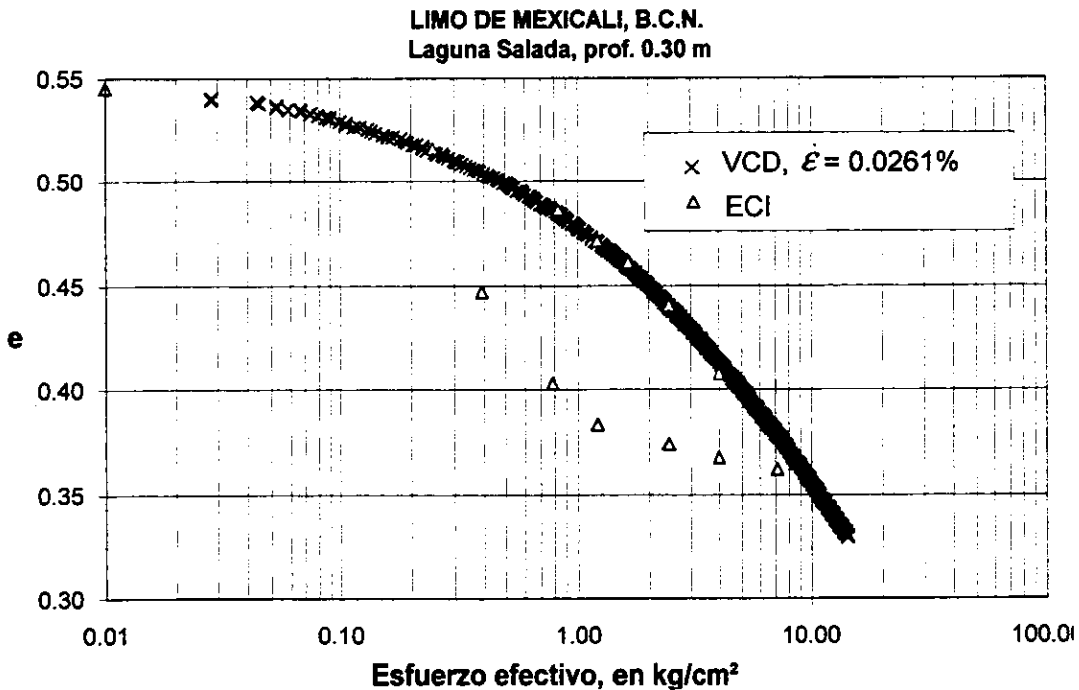


Figura 4.17 Curvas de compresibilidad determinadas con las técnicas VCD y ECI. Limo arcilloso de Mexicali, B.C.N.

Similar comportamiento al de la arcilla de La Viga, se presentó para las curvas de compresibilidad VCD y ECI del limo de Mexicali (fig. 4.17), en donde nuevamente la curva ECI se “monta” sobre la VCD en la rama de recompresión. Para los últimos incrementos de esfuerzo, la curva VCD se abre muy ligeramente hacia la derecha, por lo que de ésta se obtiene una carga de preconsolidación ligeramente mayor que la de la curva ECI, aunque al igual que en las curvas de La Viga, las cargas de preconsolidación en ambas curvas se pueden

considerar las mismas para todo fin práctico. En el ensaye VCD de este suelo, se desarrollaron valores del cociente u_b/p muy por debajo del 15%, siendo incluso menores que los del ensaye VCD de la Viga, razón por la que resultaron enteramente coincidentes las curvas de ambas técnicas, así como la carga de preconsolidación. Es importante acotar que el ensaye VCD sobre el limo de Mexicali, se realizó con una variación constante de la deformación unitaria igual a 0.0261% por minuto, que resulta menor a la velocidad de los ensaye de Puente Impulsora y La Viga de 0.0373% por minuto, por lo que era de esperarse que se desarrollaran cocientes u_b/p muy bajos.

Las curvas de compresibilidad VCD y ECI de la arcilla del Hospital Juárez (fig. 4.18), muestran coincidencias y diferencias entre sí atípicas a las que acusan las curvas de los tres suelos descritas inicialmente. La curva VCD es francamente distinta a la ECI aun desde la rama de preconsolidación, aunque es justo señalar que se obtuvieron distintas relaciones de vacíos iniciales para las muestras de ambos ensayes. Las ramas de compresión virgen de ambas curvas tienden a reducir las diferencias iniciales; desafortunadamente en este ensaye VCD, existieron problemas mecánicos, por lo que se terminó prematuramente, y no fue posible llegar a los niveles de esfuerzo que se alcanzaron en el ensaye ECI. Aun cuando no sabe con certeza la tendencia final de la rama de compresión virgen del ensaye VCD, es muy posible que corriera paralela a la curva ECI. El intervalo de esfuerzo en que se desarrolló el ensaye VCD fue suficiente para determinar con el método de Casagrande la carga de preconsolidación, que resultó mayor a la que se obtuvo con el ensaye ECI. Al igual que en todos los ensayes anteriores, se observa que la curva VCD se define a la derecha de la ECI.

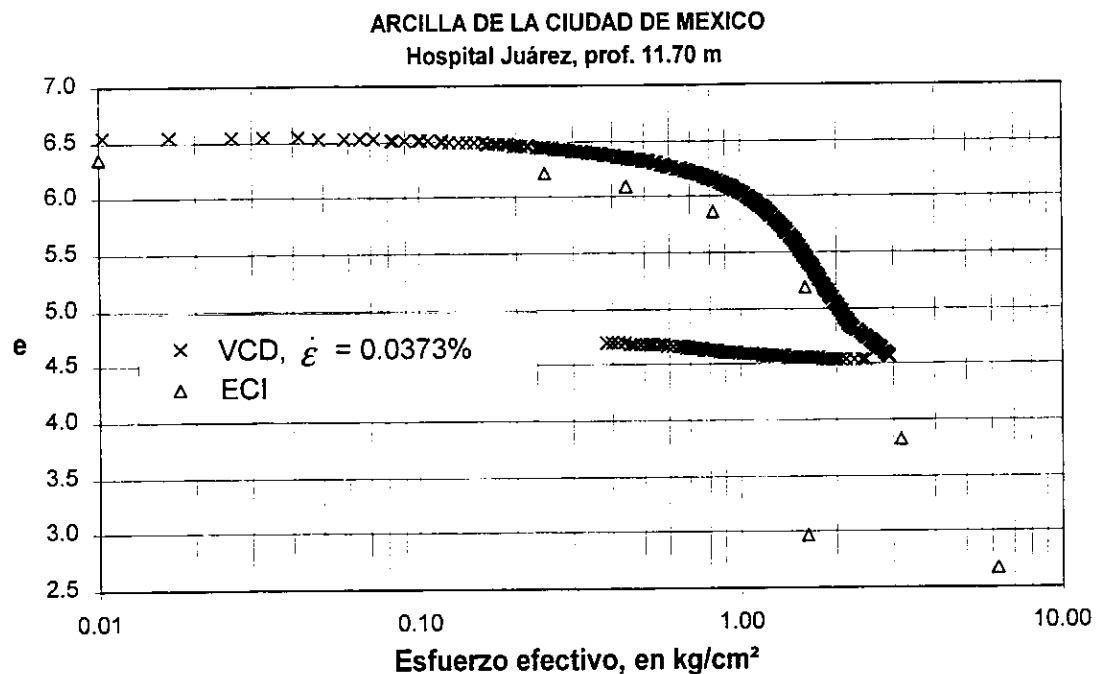


Figura 4.18 Curvas de compresibilidad determinadas con las técnicas VCD y ECI. Arcilla de la ciudad de México, zona centro

La causa de las marcadas diferencias entre las curvas de compresibilidad ECI y VCD del suelo de Hospital Juárez, se debe a los valores tan altos que alcanzó el coeficiente u_b/p en el ensaye VCD, rebasando

por mucho al límite sugerido de 15% (ver fig. 4.12), por lo que de la curva VCD se obtiene una mayor presión de preconsolidación. El ensaye VCD de Hospital Juárez, es un ejemplo típico de selección inadecuada de la velocidad de deformación para el tipo de suelo ensayado; evidentemente que esto sólo se pudo afirmar *a posteriori*, sin embargo si se hubiese empleado una velocidad menor, como la velocidad estándar de Lärsson (1981) igual a 0.012% por minuto en lugar de la que se utilizó de 0.0373% por minuto, con toda seguridad se hubieran desarrollado presiones de poro muy por debajo de las que se registraron, consecuentemente las curvas VCD y ECI tendrían mayor similitud, aunque con mucho mayor tiempo de ensaye.

De los resultados de compresibilidad observados en estos ensayos comparativos y de muchas experiencias encontradas en la literatura, se puede afirmar que la curva de compresibilidad obtenida en ensayos VCD es distinta que la ECI, debido a que en los ensayos tradicionales ECI, las velocidades equivalentes de deformación son mucho menores a las que se emplean comúnmente en los ensayos VCD; por el mismo motivo las curvas VCD reflejan menor compresibilidad que las ECI, se dibujan a la derecha de éstas y se obtienen mayores cargas de preconsolidación de ellas. Sin embargo, si durante el ensaye VCD no se desarrollan cocientes u_b/p mayores al 30%, se puede afirmar que los resultados de compresibilidad serán muy semejantes a los que se obtendrían del ensaye convencional ECI y evidentemente se obtienen en mucho menor tiempo.

Por otro lado, cabe destacar la continuidad de las curvas VCD que resultan prácticamente de un solo trazo, en virtud de la enorme cantidad de lecturas que se realizan automáticamente durante el ensaye; con ello se eliminan de una vez, las incertidumbres para la obtención de la carga de preconsolidación por métodos gráficos que frecuentemente se presentan en los ensayos ECI, en los que únicamente se cuentan con seis o siete puntos para dibujar la totalidad de la curva.

4.4.4 Curvas de permeabilidad

En las figs. 4.19 a 4.22 se presentan las gráficas de la permeabilidad, k , en escala logarítmica contra la relación de vacíos, e , de la serie de ensayos comparativos VCD y ECI. La permeabilidad de los ensayos VCD se calculó con la ec. 1.21 del capítulo 1 para $b/r=1$; la permeabilidad de los ensayos ECI se calculó mediante su asociado coeficiente de consolidación obtenido con los métodos de Taylor o Casagrande.

Para el caso de los ensayos del Puente Impulsora (fig. 4.19), se observan comportamientos similares entre la curva ECI y ambas curvas VCD. Las curvas VCD presentan una ligera diferencia entre sí al inicio del ensaye (la flecha de la figura, indica la dirección en que evoluciona la permeabilidad contra la relación de vacíos en estos ensayos), en donde ensaye2 mostró un comportamiento más impermeable que ensaye1; pasado el intervalo inicial de recompresión, ambas curvas VCD prácticamente se funden en una sola (la curva de ensaye1 termina abruptamente debido a una falla en el equipo, con lo que terminó la adquisición de datos). La razón de la diferencia inicial de permeabilidad entre ensaye1 y ensaye2, se debe a que en ensaye2 se generaron mayores presiones de poro en el intervalo de recompresión (fig. 4.9), con lo que el valor de la permeabilidad, k , obtenido con la ec. 1.21 se reduce automáticamente. La curva de permeabilidad ECI puede analizarse en dos etapas: en la rama de recompresión e incluso pasado este intervalo, es muy similar a las curvas de ensaye1 y ensaye2, con valores alternos entre ambas curvas; sin embargo los últimos dos puntos de la curva ECI, se separan en forma apreciable de la tendencia de los ensayos VCD, de tal forma que en esta etapa final la curva ECI muestra un comportamiento más impermeable que los ensayos VCD. En general puede admitirse que la similitud entre las tres curvas descritas es muy buena y las diferencias entre ellas no son significativas para fines prácticos.

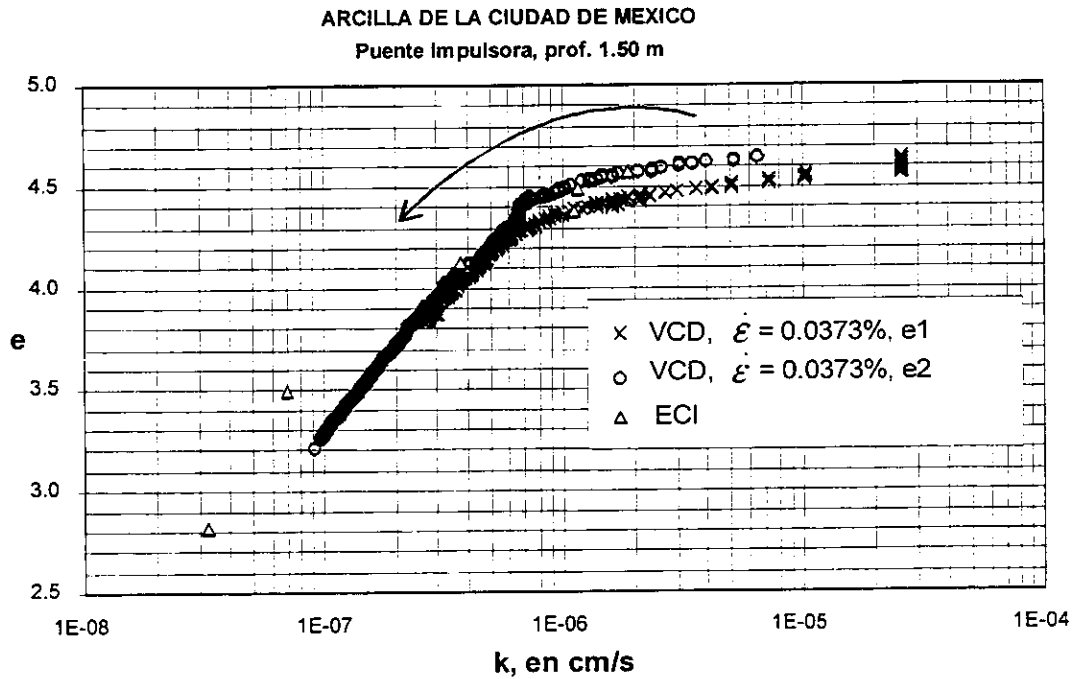


Figura 4.19 Curvas de permeabilidad obtenidas con las técnicas VCD y ECI. Arcilla de la ciudad de México, zona nororiental

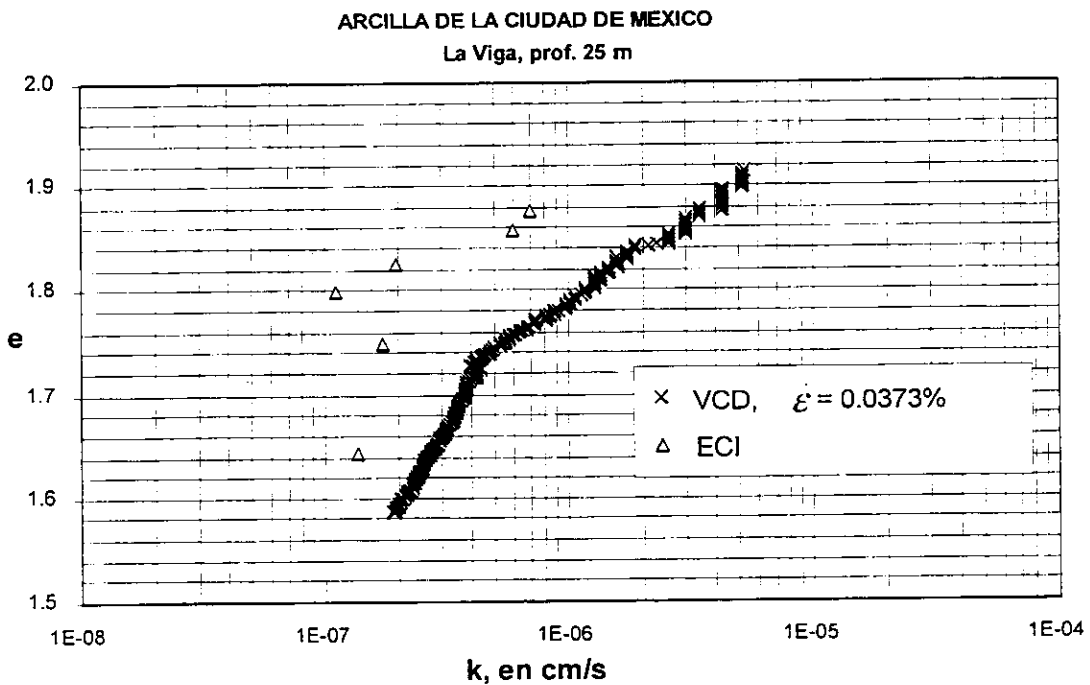


Figura 4.20 Curvas de permeabilidad obtenidas con las técnicas VCD y ECI. Arcilla de la ciudad de México, zona suroriental

La permeabilidad del suelo de La Viga que se presenta en la fig. 4.20, exhibe diferencias importantes entre las curvas ECI y VCD. La curva ECI refleja un suelo menos permeable que la curva VCD, con diferencias máximas de hasta un orden de magnitud de k . Tanto en la curva VCD como en la ECI se advierten dos tendencias muy claras: la curva de permeabilidad VCD inicia con una pendiente suave y llega a un punto dentro del intervalo de compresión virgen, donde la pendiente se torna más pronunciada; de la misma forma la curva ECI inicia con una pendiente suave paralela a la VCD, y aproximadamente en el mismo punto del intervalo virgen, la pendiente se incrementa notablemente a la vez que se acerca a la curva VCD. Puede parecer contradictorio que las curvas de compresibilidad ECI y VCD de este suelo resultaran prácticamente las mismas (fig. 4.16) mientras que existen diferencias importantes en sus contrapartes de permeabilidad; al respecto llama la atención los valores tan bajos de presión de poro que se desarrollaron en el ensaye VCD, con lo que inevitablemente se computan valores de k altos atendiendo a la forma de la ec. 1.21, y quizás inadecuados; en todo caso es recomendable mantener los cocientes u_b/p mayores al 3% tal como lo recomienda la norma ASTM D4186 (1989). Es prudente señalar que en el ensaye ECI del suelo de la Viga, se tuvieron dificultades para determinar el t_{50} de la curva de consolidación, por lo que el coeficiente de consolidación se determinó con la construcción de Taylor, y con éste a su vez se calculó el coeficiente de permeabilidad.

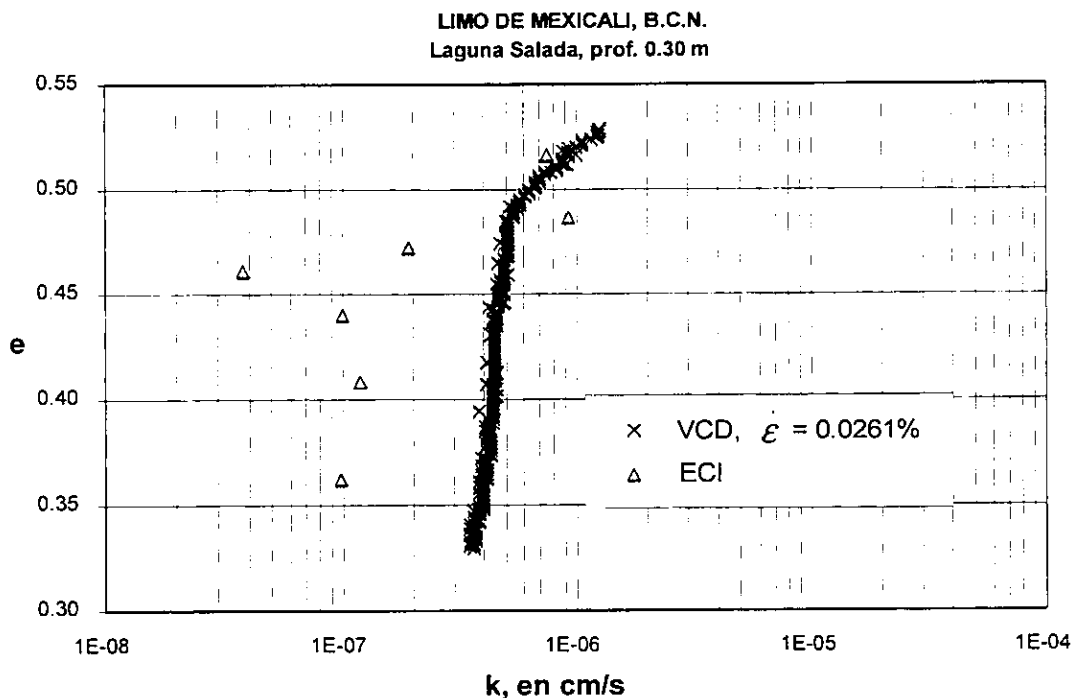


Figura 4.21 Curvas de permeabilidad obtenidas con las técnicas VCD y ECI. Limo arcilloso de Mexicali, B. C. N.

Las curvas de permeabilidad contra la relación de vacíos obtenidas con ECI y VCD para el limo de Mexicali se presentan en la fig. 4.21; en éstas se aprecia un comportamiento similar al de la arcilla preconsolidada de La Viga, ya que la curva ECI corresponde a la de un suelo menos permeable que la obtenida con VCD. La curva VCD presenta un tramo inicial de pendiente suave, y en la rama de compresión virgen se mantiene prácticamente con un valor constante de permeabilidad; la curva ECI presenta igualmente

una tendencia inicial de pendiente suave, y posteriormente se mantiene prácticamente con un sólo valor de k . Nuevamente llama la atención que a pesar de que las curvas de compresibilidad ECI y VCD de este suelo resultaron enteramente semejantes (fig. 4.17), sus contrapartes de permeabilidad acusan diferencias mayores, en donde la curva VCD refleja un comportamiento de mayor permeabilidad quizás influido por las presiones de poro tan bajas (menores al 1%) que se generaron en buena parte del ensaye, y que atendiendo a la forma de la ec. 1.21 arroja valores de k mayores. Al igual que para el suelo de La Viga, los valores del coeficiente de consolidación y su asociado de permeabilidad para este suelo, se obtuvieron con el método de Taylor.

Las gráficas de permeabilidad ECI y VCD que mostraron mayor similitud, fueron las correspondientes a la arcilla suave del Hospital Juárez (fig. 4.22). En ambas curvas de permeabilidad se advierte la misma tendencia, que empieza con una pendiente muy suave en el tramo de recompresión, y una vez pasado este intervalo la curva toma una pendiente mayor que se mantiene constante hasta el final del ensaye. Es notable que las altas presiones de poro que se generaron en el ensaye VCD, hayan repercutido desfavorablemente en la curva de compresibilidad (fig. 4.18) según se analizó en un inciso previo, y no se reflejaron en la curva de permeabilidad, que resulta enteramente semejante a la curva ECI, lo que puede significar que la permeabilidad con VCD sea menos sensible a la presión de poro que la compresibilidad, aunque serían necesario realizar más ensayes para comprobar lo anterior.

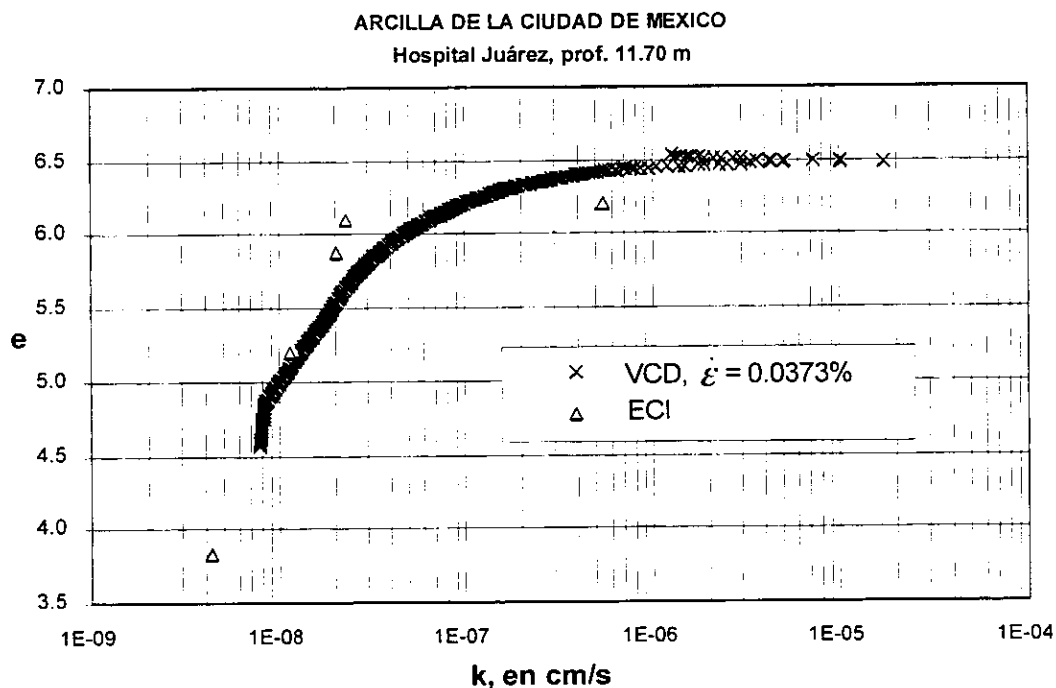


Figura 4.22 Curvas de permeabilidad obtenidas con las técnicas VCD y ECI. Arcilla de la ciudad de México, zona centro

De las comparaciones entre permeabilidad obtenida con las técnicas ECI y VCD de esta serie de ensayes, se puede afirmar que en general la técnica VCD refleja mayor permeabilidad que la que se obtiene con ECI; los ensayes VCD en los que se generen cocientes u_b/p muy pobres del orden de 1%, acusan diferencias de permeabilidad importantes cuando se les compara con los ensayes ECI, por lo que es recomendable que sean mayores al 3%; todas las curvas de permeabilidad en escala logarítmica contra

relación de vacíos de los ensayos VCD muestran dos pendientes bien definidas, una suave en el tramo de recompresión y otra más pronunciada en el tramo de compresión virgen.

4.4.5 Coeficiente de consolidación

Las líneas de esfuerzo efectivo contra el coeficiente de consolidación, c_v , en escala semilogarítmica para los ensayos comparativos ECI y VCD, se presentan de las figs. 4.23 a 4.26. El coeficiente de consolidación para los ensayos VCD se calculó con la ec. 1.23 del capítulo 1, con $b/r=1$.

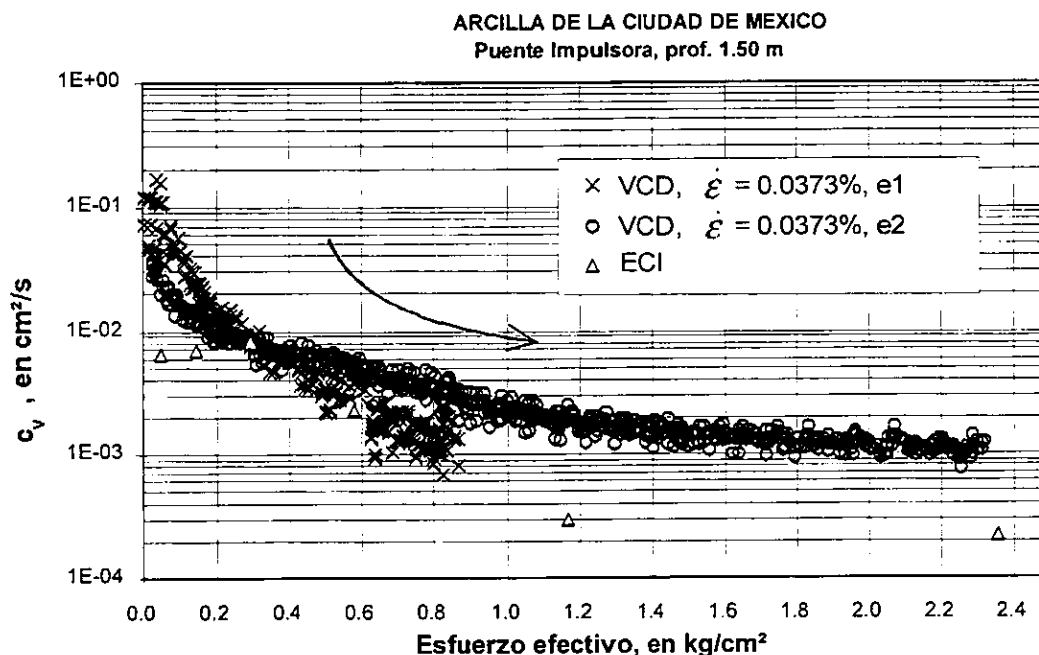


Figura 4.23 Coeficiente de consolidación en ensayos VCD y ECI sobre arcilla de la ciudad de México, zona nororiente

Los coeficientes de consolidación de los ensayos VCD y ECI de la arcilla de Puente Impulsora (fig. 4.23), muestran, en general, gran semejanza entre sí. Las dos gráficas VCD siguen prácticamente la misma tendencia que la ECI, con los valores mayores para la etapa de recompresión que disminuyen paulatinamente hasta estabilizarse en una franca línea horizontal en la etapa de compresión virgen. Tal vez la diferencia más notable estriba en que los valores del coeficiente de consolidación con ECI son menores a los de los dos ensayos VCD, siendo estas diferencias mayores en la etapa de consolidación virgen. Así mismo, se puede observar que el ensaye2 tiene valores de c_v ligeramente menores que ensaye1 al principio de la prueba, y en la etapa de compresión virgen ocurre lo contrario. El comportamiento de los valores de c_v en los ensayos VCD, es muy comprensible si se atiende al comportamiento de la presión de poro que se registró en ambos (fig. 4.9) y a la forma de la ec. 1.23, es decir que en los ensayos VCD, para un suelo en particular, mayores presiones de poro reflejan menores valores del coeficiente de consolidación y viceversa. Es de destacarse que existe dispersión de valores en estas gráficas VCD, sobre todo en el ensaye1.

Los coeficientes de consolidación, c_v , que se obtuvieron con las técnicas VCD y ECI para la arcilla preconsolidada de La Viga, se presentan en la fig. 4.24. Ambas curvas muestran diferencias en valor de hasta un orden de magnitud en la etapa de recompresión, y disminuyen suavemente conforme crece el valor del esfuerzo efectivo. Para cualquier punto de las gráficas, los valores de c_v obtenidos con VCD son mayores que los ECI, a pesar de que estos últimos se calcularon con Taylor, que según Lambe y Whitman (1969), da como resultado valores mayores de c_v que el método de Casagrande. El que los valores de c_v con la técnica VCD sean mayores que los ECI, quizás se deba a las pobres presiones de poro que se desarrollaron en buena parte del ensaye VCD (u_b/p del 1%, fig. 4.10), con lo que se computan valores altos de c_v debido a la forma de la ec. 1.23, según se comenta arriba. Más allá de las diferencias de valores entre los coeficientes de consolidación, las tendencias de las curvas ECI y VCD son igualmente distintas, ya que se observa que la curva VCD sigue una tendencia muy clara, en donde presenta los valores máximos de c_v en el intervalo de recompresión y éstos disminuyen paulatinamente conforme avanza la prueba, mientras que la curva ECI presenta una tendencia irregular y acusa dispersión en sus valores iniciales.

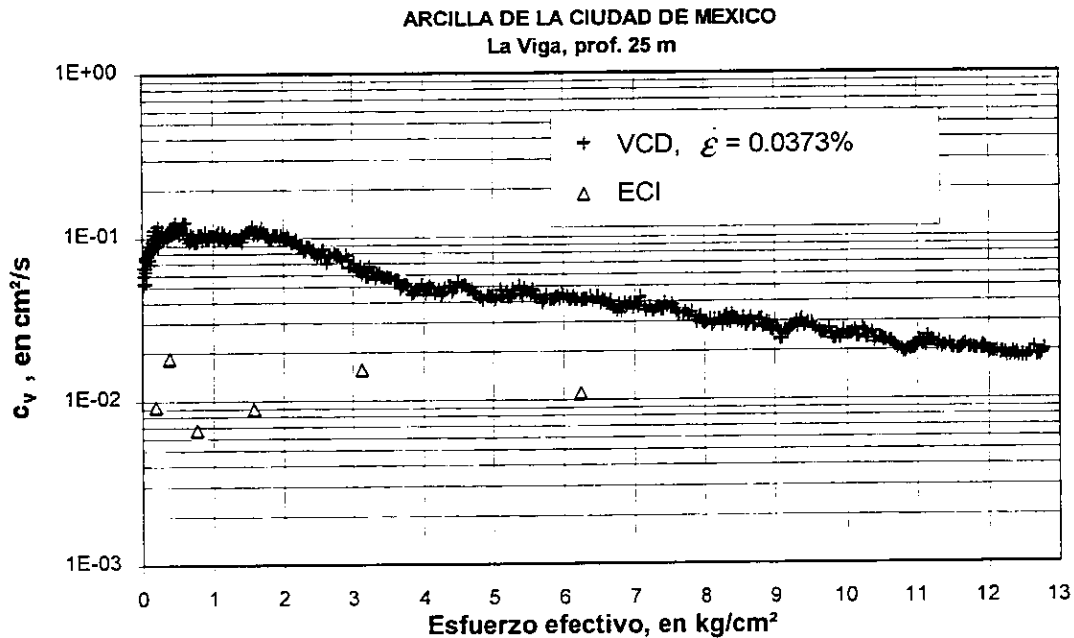


Figura 4.24 Coeficiente de consolidación en ensayos VCD y ECI sobre arcilla de la ciudad de México, zona suroriental

Los coeficientes c_v del limo de Mexicali obtenidos con ECI y VCD, se ilustran en la fig. 4.25. De la misma gráfica, se aprecia que los valores de c_v resultan mayores en la curva VCD que en la ECI; en esta última los valores de c_v se calcularon con el método de Taylor. Debe decirse que al igual que en el suelo de La Viga, en el limo de Mexicali se desarrollaron presiones de poro muy pequeñas, por lo que atendiendo a la forma de la ec. 1.23, los valores del coeficiente de consolidación son mayores. Nuevamente se advierte una tendencia incierta en los valores c_v obtenidos con ECI en la etapa de recompresión, mientras que la curva VCD tiene una tendencia bien definida. Más allá del intervalo inicial, el coeficiente de consolidación obtenido con ambas técnicas muestran una tendencia claramente ascendente, lo cual es contrario a las tendencias descritas de las arcillas de Puente Impulsora y La Viga.

En la fig. 4.26 se presentan las gráficas de esfuerzo efectivo contra el coeficiente de consolidación obtenidas con las técnicas ECI y VCD para la arcilla suave del Hospital Juárez. La similitud entre la tendencia de ambas gráficas es muy buena, en donde se encuentra un valor máximo de c_v en el intervalo de recompresión, que disminuye rápidamente y parece estabilizarse al final de la prueba; sin embargo, se aprecia que los valores de c_v que se obtuvieron con la técnica VCD siguen siendo ligeramente mayores a los ECI. Debe destacarse que en el ensaye VCD se desarrollaron altas presiones de poro muy por encima de lo recomendado (fig. 4.11), por lo que de la ec. 1.23, los valores de c_v se vieron disminuidos, favoreciendo la coincidencia con la curva ECI. Es de destacarse el amplio intervalo de valores en que se dibujan tanto la curva ECI como la VCD, ya que abarcan tres ordenes de magnitud, indicando la alta compresibilidad de este suelo.

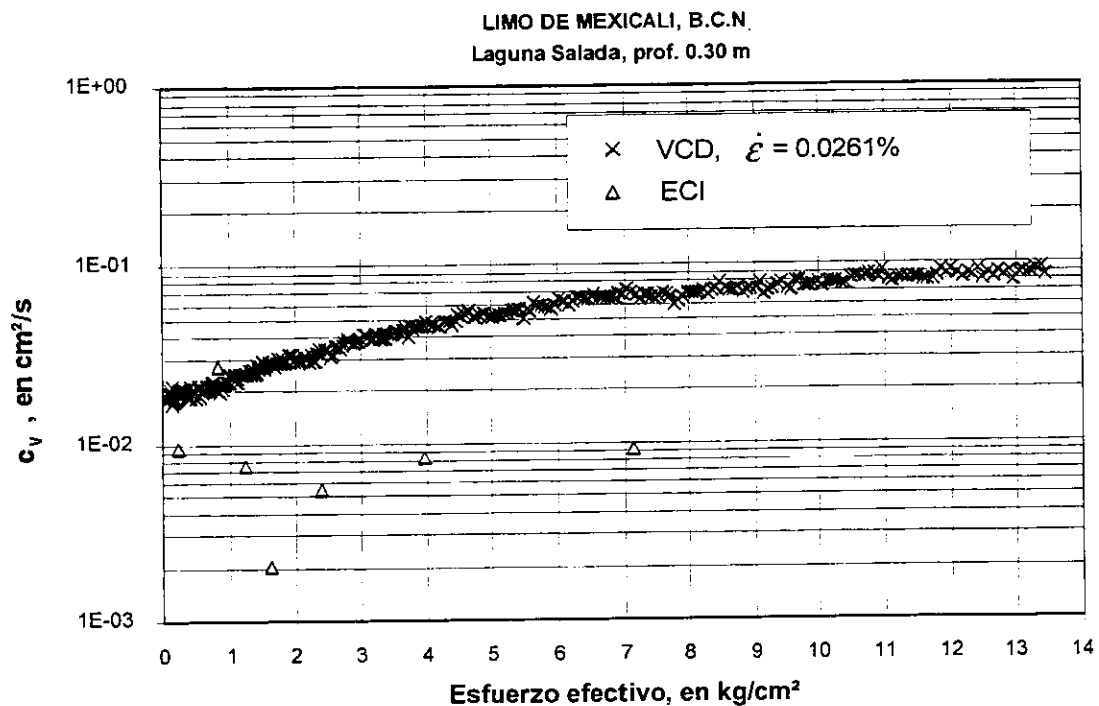


Figura 4.25 Coeficiente de consolidación en ensayos VCD y ECI sobre limo arcilloso de Mexicali, en Baja California Norte

De las gráficas de coeficiente de consolidación contra esfuerzo efectivo que arriba se describen, se puede afirmar que los valores de c_v obtenidos mediante la técnica VCD resultan mayores que los de la ECI; las diferencias de valores del coeficiente de consolidación entre ambas técnicas, se presentan principalmente en el intervalo de recompresión y no fueron mayores a un orden de magnitud; las curvas ECI y VCD de ensayos paralelos que acusan mayores diferencias, corresponden a la de aquellos ensayos VCD en los que se desarrollaron cocientes u_b/p del orden del 1% por lo que se recomienda que el límite inferior para esta variable sea del 3%; los valores del coeficiente de consolidación con la técnica VCD, muestran tendencias bien definidas y con menor dispersión de valores que las ECI.

Es de destacarse que la altura de las muestras VCD, fue mayor a la de los especímenes ECI, y es bien sabido que el coeficiente de consolidación que se obtiene de pastillas gruesas es mayor al que se obtiene de pastillas delgadas (Leroueil, 1988). Aunque la diferencia de alturas entre especímenes de una y otra técnica

fue muy pequeña (6.98 mm), para futuras comparaciones se recomienda utilizar especímenes de la misma altura.

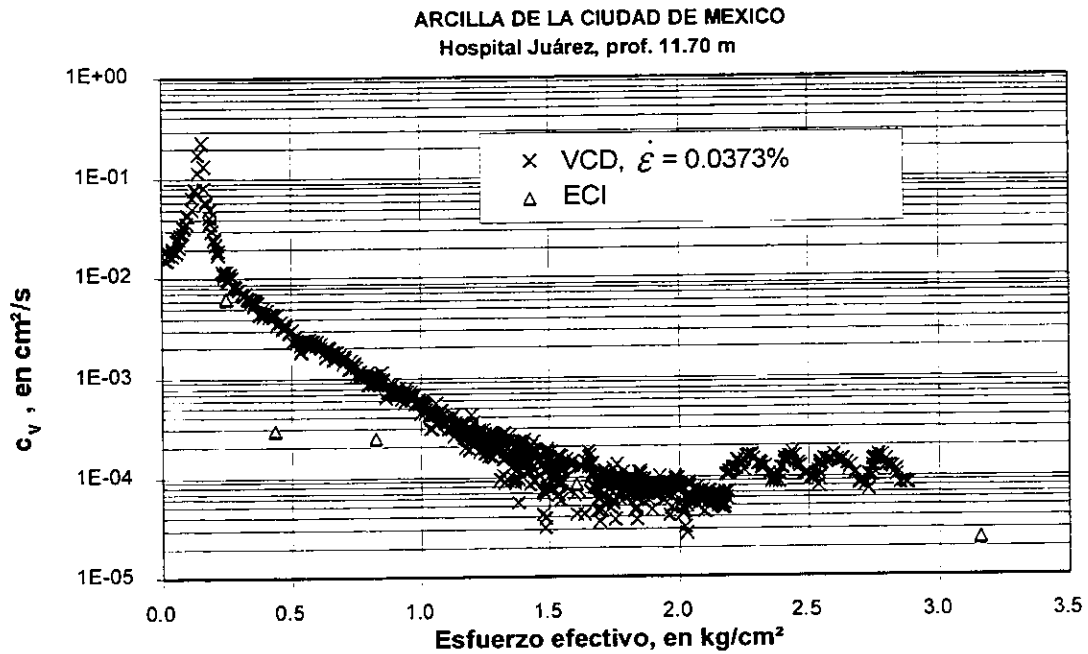


Figura 4.26 Coeficiente de consolidación en ensayos VCD y ECI sobre arcilla de la ciudad de México, zona centro

4.5 PROPIEDADES MECÁNICAS Y TIEMPOS DE ENSAYE

Con el objeto de concentrar y comparar los resultados que se describen en el presente capítulo, en la tabla 4.2 se resumen las propiedades mecánicas de la serie de ensayos comparativos ECI y VCD sobre los cuatro tipos de suelo estudiados. Los datos incluyen la carga de preconsolidación, p_c , que se obtuvo con el método de Casagrande tanto para los ensayos ECI como para los VCD; así mismo se muestran los valores máximos y mínimos de los coeficientes de consolidación, c_v , y permeabilidad, k , (estos parámetros se obtuvieron en los ensayos ECI mediante Taylor o Casagrande); así como el valor máximo del cociente u_b/p que se desarrolló en los ensayos VCD.

Como lo indican los resultados de la tabla 4.2, la carga de preconsolidación obtenida con la técnica VCD es siempre mayor que la obtenida con los ensayos tradicionales ECI, resultando en promedio 17% más grande (Leroueil (1988), encontró similares resultados en arcillas canadienses, y señala que la carga de preconsolidación con la técnica VCD es 28% mayor en promedio que la ECI). Lo anterior era de esperarse debido a los efectos de la velocidad de deformación en la compresibilidad de las arcillas, y debe ser considerado en el análisis de asentamientos, para lo que se pueden utilizar métodos de corrección gráfica (Sällfors, 1975), con los que se obtienen cargas de preconsolidación "convencionales". Es de destacarse que la diferencia mayor de la carga de preconsolidación con una y otra técnica, se presentó para la arcilla de Hospital Juárez, en la que el cociente u_b/p alcanzó el 60% en el ensayo VCD.

De manera análoga a la carga de preconsolidación, el coeficiente de consolidación obtenido con la técnica VCD resulta mayor al que se obtiene con la tradicional técnica ECI, mientras que el coeficiente de permeabilidad exhibe diferencias menores, aunque siempre resultando un comportamiento más permeable con la técnica VCD.

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas de los suelos ensayados en el programa experimental

Suelo ensayado	Ensayes ECI					Ensayes VCD					
	p_c kg/cm ²	C_v max cm ² /s	C_v min cm ² /s	k max cm/s	k min cm/s	u_b/p max %	p_c kg/cm ²	C_v max cm ² /s	C_v min cm ² /s	k max cm/s	k min cm/s
Puente Impulsora	0.55	8.0×10^{-3}	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-6}	3.0×10^{-8}	e1 11.5 e2 11.0	0.55 0.70	1.5×10^{-1} 4.0×10^{-2}	7.0×10^{-4} 8.0×10^{-4}	2.5×10^{-5} 6.5×10^{-6}	2.5×10^{-9} 9.0×10^{-9}
La Viga	3.00	1.8×10^{-2}	6.7×10^{-3}	7.0×10^{-7}	1.1×10^{-7}	13	3.50	1.1×10^{-1}	1.8×10^{-2}	5.1×10^{-6}	1.8×10^{-7}
Hospital Juárez	1.00	6.3×10^{-3}	1.3×10^{-5}	5.4×10^{-7}	1.1×10^{-9}	60	1.20	2.2×10^{-1}	2.7×10^{-5}	1.8×10^{-5}	8.0×10^{-9}
Mexicali	2.00	2.0×10^{-2}	2.0×10^{-3}	9.2×10^{-7}	3.8×10^{-8}	9.2	2.10	9.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}	1.2×10^{-6}	3.3×10^{-7}

En la tabla 4.3 se resume el número de incrementos de esfuerzo impuesto a los ensayos tradicionales de esfuerzo controlado incremental, ECI, y el tiempo que se consumió para concluir la labor experimental sin considerar la descarga; de igual forma se resumen las variaciones de la deformación unitaria con el tiempo que se utilizaron en los ensayos de velocidad constante de deformación, VCD, así como el tiempo necesario para concluir la labor experimental con esta técnica.

Tabla 4.3 Resumen de tiempos para concluir la labor experimental de ensayos VCD y ECI

Suelo ensayado	Ensayes ECI			Ensayes VCD		
	Número de incrementos	σ_{max} kg/cm ²	Tiempo experimental días	$\dot{\epsilon}$ % por minuto	σ_{max} kg/cm ²	Tiempo experimental horas
Puente Impulsora	6	2.4	6	e1 ¹ 0.0373 e2 ¹ 0.0373	0.92 ² 2.4	5 13
La Viga	6	6.26	8	0.0373	13.3	10
Hospital Juárez	6	6.27	7	0.0373	2.9 ³	6.5
Mexicali	7	7	8	0.0261	6.27	14

1 ensaye1, ensaye2

2 Prueba interrumpida debido a falla en el equipo

3 Se rebasó el rango de adquisición del transductor de presión de poro; prueba interrumpida

Por una simple comparación de los datos contenidos en la tabla 4.3, se puede comprobar que el tiempo necesario para concluir la parte experimental de un ensaye de consolidación con VCD, es considerablemente menor al que requiere la técnica tradicional de ECI, ya que mientras los primeros requirieron de solamente algunas horas, la técnica tradicional ECI consumió más de 6 días. Si aunado a lo anterior se considera que la reducción de los datos en los ensayes VCD es automática, se tiene que los resultados de compresibilidad, consolidación y permeabilidad pueden conocerse típicamente en dos jornadas de trabajo, mientras que en los ensayes ECI, en los que la reducción de registros es manual, se requieren de dos semanas para conocer los mismos parámetros y sus gráficas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En los capítulos precedentes se describieron las características y puesta en operación de un consolidómetro automatizado, con el que es posible determinar las propiedades de compresibilidad de los suelos finos bajo velocidad constante de deformación, VCD; se trata de una técnica poco usada en México aunque de uso generalizado por ejemplo en los países escandinavos. Se expusieron los principios teóricos con los que se interpreta este tipo de ensaye y se presentó un programa comparativo con los resultados experimentales de ensayos VCD y los tradicionales de esfuerzo controlado incremental, ECI, en un reducido número de suelos; su objetivo era sólo verificar el funcionamiento correcto del equipo. Con base en lo anterior, se derivan las siguientes conclusiones:

1. El consolidómetro prototipo permite llevar a cabo ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación, obteniendo de manera rápida y precisa las propiedades de compresibilidad y permeabilidad de los suelos finos. Su funcionamiento general es el siguiente: por medio de una máquina de compresión con selector de velocidades se comprime a una muestra cilíndrica de suelo alojada en un anillo metálico fijo y sellado a la base; un transductor de presión registra la presión de poro en la cara inferior de la muestra, una celda de carga mide la fuerza con la que reacciona el suelo mientras que un transductor de desplazamiento hace lo propio con las deformaciones.
2. El registro de la presión de poro, fuerza y deformación que miden los transductores durante el ensaye, se realiza en forma automática por medio de un sistema de adquisición de datos del tipo abierto, y puede monitorearse en tiempo real a través de la pantalla de la computadora. La reducción de los registros experimentales es fácil y rápidamente realizada al emplear alguna hoja de cálculo, como por ejemplo Excel.
3. Los ensayos VCD proporcionan curvas de compresibilidad así como de la variación de los coeficientes de consolidación y de permeabilidad con respecto a la deformación o relación de vacíos prácticamente continuas, con lo que por ejemplo se eliminan las incertidumbres que a menudo se presentan para determinar el esfuerzo de preconsolidación en las curvas ECI, debido al reducido número de puntos con que se grafican.
4. La labor experimental de los ensayos VCD efectuados, consumió de 5 a 14 horas, mientras que los ensayos tradicionales ECI con incrementos de carga a cada 24 horas, requirieron de 6 a 8 días. A los tiempos anteriores habría que añadir la dilatada reducción de datos en los ensayos ECI, ya que éstos se registran en forma manual.
5. Los ensayos VCD se analizaron con el método de Smith y Wahls (1969), que supone una variación lineal de la relación de vacíos con la profundidad en la muestra. La suposición anterior será suficientemente precisa en la medida que el cociente de la presión de poro que se mide en la base y el esfuerzo total, u_v/p , sea menor al 30%.

6. Las velocidades de deformación impuestas a los ensayos VCD entre 0.0261% y 0.0373% por minuto, provocaron cocientes de la presión de poro y el esfuerzo total, u_v/p , menores al 15%, excepto para la arcilla del Hospital Juárez, de la ciudad de México, en la cual se alcanzaron valores del 60%.

7. El reducido número de ensayos de consolidación apunta a que las curvas de compresibilidad obtenidas con las técnicas VCD y ECI, resultan prácticamente las mismas, excepto cuando se rebasa el 30% del cociente u_v/p en los ensayos VCD.

8. Los coeficientes de consolidación y permeabilidad obtenidos con la técnica VCD, resultaron ligeramente mayores a los de la ECI, aunque para todo fin práctico pueden considerarse semejantes.

Los datos anteriores muestran la bondad y potencialidad de los ensayos VCD para obtener las propiedades de compresibilidad y permeabilidad de los suelos finos de manera rápida y precisa, ya que se logran resultados completamente equiparables a los de las pruebas ECI en tan sólo unas horas; además, con la automatización del prototipo la operación es completamente funcional dado que no se necesita personal que coloque cargas o registre lecturas durante la labor experimental.

Es conveniente destacar que el costo de un equipo VCD es varias veces mayor al de uno tradicional ECI, aunque las ventajas inherentes pueden amortizar rápidamente el aparente elevado costo inicial en función de su mayor productividad.

5.2 RECOMENDACIONES

Una vez que se cumplió con el objetivo de este trabajo, en el sentido de poner en operación y verificar el correcto funcionamiento del prototipo VCD para realizar ensayos de consolidación, se emiten las siguientes recomendaciones:

1. Efectuar un amplio programa experimental en el que se comparen resultados de ensayos paralelos VCD y ECI sobre una diversidad de suelos.
2. Realizar ensayos VCD con diferentes velocidades sobre un mismo tipo de arcilla, para corroborar lo presentado en estudios anteriores realizados en el extranjero respecto al efecto de la velocidad de deformación.
3. Implementar, mediante la programación del software utilizado, un interruptor de seguridad al prototipo para que se pare automáticamente el ensaye cuando se alcance la capacidad máxima de alguno de los transductores.
4. Acondicionar una cámara al consolidómetro, de tal forma que pueda aplicarse contrapresión para asegurar desde el principio la saturación de la muestra.
5. Programar la adquisición de datos para que pueda graficarse durante el ensaye, el desarrollo de la curva de compresibilidad, así como la curva del cociente u_v/p contra la deformación unitaria.

APÉNDICE A

ECUACIÓN DIFERENCIAL DEL PROCESO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE ESTRATOS IDEALIZADOS DE ARCILLA

A.1 ANALOGÍA MECÁNICA DE TERZAGHI

Para iniciar el planteamiento y desarrollo matemático que conduce a la ecuación diferencial de la consolidación unidimensional (ec. 1.1, capítulo 1), es necesario ilustrar primero el fenómeno de la consolidación; para ello, se presenta a continuación la analogía hidromecánica propuesta por Terzaghi (1943).

Considérese la fig. A.1, en la que se representa un recipiente circular prismático de material rígido con área transversal, A . El recipiente se encuentra lleno de un líquido incompresible. Dentro del cilindro se ajusta perfectamente un émbolo hecho también de material rígido, con una pequeña perforación que conecta a una válvula abierta; el émbolo se soporta mediante un resorte. Supóngase que el sistema está en equilibrio en un principio, de tal forma que no existe ninguna diferencia de presiones entre el interior y el exterior que establezca un flujo a través de la válvula del émbolo.

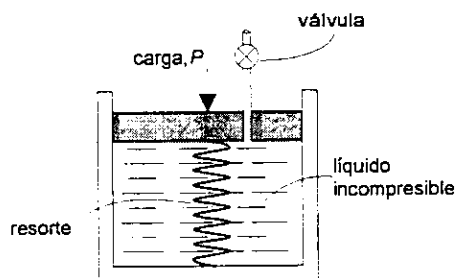


Figura A.1 Modelo mecánico de Terzaghi (1943) para consolidación

Si ahora se aplica una carga vertical P , como la que se indica en la misma figura, y a la vez se cierra la válvula, el émbolo no puede desplazarse, de tal suerte que el resorte tampoco puede deformarse, por lo que la carga P se soporta íntegramente por el líquido (se desprecia la fricción entre el recipiente y el émbolo), creándose una presión en exceso de la hidrostática, u , en el seno de éste igual a P/A . Ahora bien, si se abre la válvula existirá, en un principio, una diferencia de presiones entre el interior y el exterior del recipiente igual a P/A , por lo que se inicia un flujo a través de la válvula que permite que el resorte se deforme y tome carga de acuerdo con la ley de Hooke.

En las condiciones anteriores, existe una transferencia gradual de carga del líquido al resorte, cuya velocidad depende de la abertura de la válvula y de la viscosidad del fluido, es decir, mientras más rápido se pueda desalojar el líquido del interior del recipiente, más veloz será el alivio de la sobrepresión, u . El proceso de flujo y transmisión de carga del líquido al resorte termina hasta que el resorte se deforma lo suficiente para soportar íntegramente la carga P , con lo que el líquido regresa a su condición hidrostática.

Supóngase ahora que en lugar de una sola cámara, se tienen una serie de cámaras conectadas con la construcción que se ilustra en la fig. A.2. Considérese que el sistema está en equilibrio en un principio, es decir, que la única presión existente en el líquido es la hidrostática; esta condición se representa mediante la línea 1-2. Al aplicar una carga P sobre el émbolo superior, se transmite instantáneamente al seno del fluido una presión en exceso de la hidrostática, u , igual a P/A y evidentemente, el total de la carga se soporta inicialmente por el líquido; tal condición se ilustra mediante la línea 3-4.

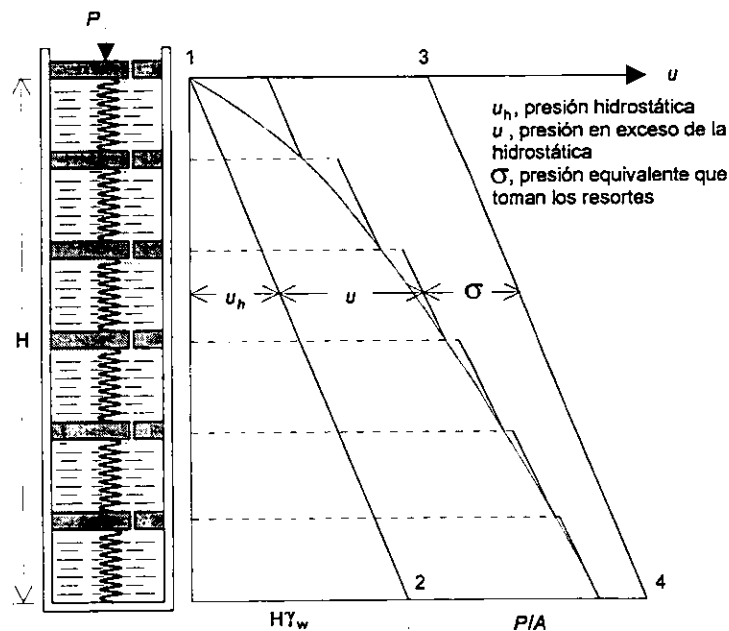


Figura A.2 Modelo mecánico de cámaras múltiples de Terzaghi (1943) para consolidación en suelos finos

La diferencia de presión igual a P/A , entre el líquido y el exterior, origina el flujo del líquido de la primera cámara hacia afuera, con lo que la sobrepresión disminuye; simultáneamente el resorte de la cámara superior se deforma y toma parte de la carga. Al reducirse la presión en el líquido de la cámara superior, se establece un gradiente entre ésta y la segunda, lo que origina el flujo del líquido de la segunda cámara hacia la primera, resultando también una disminución de presión y la deformación del resorte de la cámara correspondiente. De esta manera, la diferencia de presiones entre cámaras adyacentes transmite la tendencia del flujo en forma sucesiva a las cámaras inferiores y los resortes toman gradualmente la carga. El proceso concluye hasta que se alivia la

presión en exceso de la hidrostática en el seno del líquido, de tal suerte que regresa a la condición hidrostática y la carga P se soporta totalmente por los resortes.

En la fig. A.2, se ilustra mediante la línea quebrada, la distribución de presiones en el líquido, u , y los resortes, σ , a cualquier profundidad, z , y para un instante t . Es claro el hecho de que en la medida en que el tiempo transcurre, la línea quebrada de la fig. A.2 se desplaza hacia la izquierda, teniendo como límite la línea 1-2 de la condición hidrostática. Por lo anterior, se puede afirmar que la sobrepresión, u , es función de la profundidad y del tiempo: $u=f(z, t)$.

Si se tuviese un gran número de cámaras con pequeño volumen, el modelo de la fig. A.2 se acercaría a la condición real que prevalece en los suelos, en donde los resortes representan el esqueleto-estructura de las partículas sólidas, el líquido incompresible representa el agua intersticial, la válvula trabaja en forma análoga a la permeabilidad del suelo y los orificios de los émbolos representan los canalículos capilares; en la medida que crezca el número de cámaras, la línea quebrada tenderá a ser una línea curva.

De todo lo anterior, se deduce que la consolidación unidimensional de una masa de suelo, es un fenómeno hidrodinámico con reducción de volumen que se desarrolla a través del tiempo, y que se origina al cambiar el estado de esfuerzo efectivo original.

A.2 HIPÓTESIS DE LA TEORÍA DE LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Terzaghi (1943) obtuvo una función que representa el comportamiento ideal de la presión de poro en un proceso de consolidación, para lo que introdujo algunas hipótesis con la intención de simplificar el problema. Las hipótesis son:

1. Los vacíos del suelo están completamente llenos de agua
2. El agua y las partículas sólidas son perfectamente incompresibles
3. Se cumple la ley de Darcy para el flujo de agua a través de materiales porosos
4. El suelo está confinado lateralmente
5. Los esfuerzos totales y efectivos son iguales en cualquier punto de una sección horizontal del suelo
6. Un incremento de la presión efectiva de σ_0 a σ provoca un decremento de la relación de vacíos de e_0 a e
7. El coeficiente de compresibilidad que se expresa en la forma:

$$a_v = \frac{e_0 - e}{\sigma - \sigma_0} \quad \text{A.1}$$

se considera constante para el intervalo de esfuerzo de σ_0 a σ

8. El coeficiente de permeabilidad, k , es constante
9. La dilación del proceso de consolidación, se debe integralmente a la permeabilidad del suelo

A.3 CONSIDERACIONES GENERALES

Con la finalidad de establecer algunas definiciones que se ocupan en el planteamiento de la ecuación diferencial de la consolidación 1.1 del capítulo 1, ahora se expresa el coeficiente de compresibilidad, a_v , definido anteriormente por la ec. A.1, en la forma:

$$e_0 - e = a_v (\sigma - \sigma_0) \quad \text{A.2}$$

donde la cantidad $e_0 - e$, representa el decremento del volumen de vacíos de un bloque de suelo con volumen inicial, V_0 , igual a $1 + e_0$; semejante elemento de suelo se ilustra en la fig. A.3.

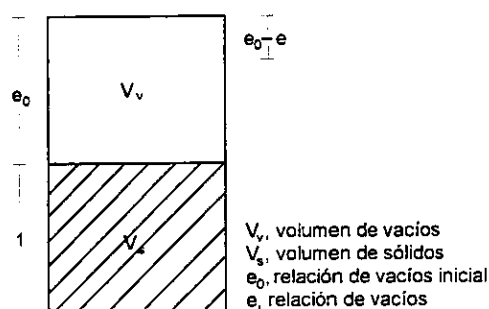


Figura A.3 Elemento de suelo con volumen inicial igual a $1 + e_0$

Considerando la fig. A.3, la porosidad para e_0 y e es $n_0 = \frac{e_0}{1 + e_0}$ y $n = \frac{e}{1 + e_0}$ respectivamente, de tal forma que el decremento del volumen de vacíos por unidad de volumen inicial (porosidad), Δn , se puede escribir combinando las anteriores expresiones y la ec. A.2 en la forma:

$$\Delta n = n_0 - n = \frac{a_v}{1 + e_0} (\sigma - \sigma_0) = m_v (\sigma - \sigma_0) = m_v \Delta \sigma \quad \text{A.3}$$

donde m_v se define como el coeficiente de variación volumétrica y $\Delta \sigma$ es el incremento de presión efectiva. Con estas definiciones y expresiones, se está en condiciones de plantear la ecuación diferencial de la consolidación.

A.4 ECUACIÓN DIFERENCIAL DE LA CONSOLIDACIÓN

A.4.1 Planteamiento

Según se estableció antes, en un proceso de consolidación unidimensional la presión de poro en exceso de la hidrostática, u , es función de la profundidad, z , y del tiempo, t , es decir, $u=f(z, t)$; se intenta ahora obtener dicha función. Para ello Smith y Wahls (1969), retoman las hipótesis de la teoría de la consolidación unidimensional que se enuncian al inicio del apéndice, excepto la que se refiere al coeficiente de permeabilidad como una constante, con esto hacen un desarrollo muy similar al de la teoría de Terzaghi (1943).

Refiérase ahora a la fig. A.4 en la que se representan distribuciones de presión de poro en un estrato de suelo con el NAF en la frontera superior. Sobre el terreno se aplica una presión uniformemente distribuida, p_1 . Según se deduce de la analogía hidromecánica de Terzaghi (1923), la presión uniforme, p_1 , que se transmite al terreno, se soporta inicialmente por el agua intersticial, por lo que la presión hidrostática del suelo se incrementa a cualquier profundidad en un valor igual a p_1 . Como puede deducirse de la fig. A.4, la sobrepresión, u , se disipa a través del tiempo y se transfiere gradualmente la carga al suelo, de tal forma que mientras la sobrepresión, u , y el esfuerzo efectivo, σ , varían con la profundidad y el tiempo, la presión total, p , se mantiene constante durante y después del proceso de consolidación.

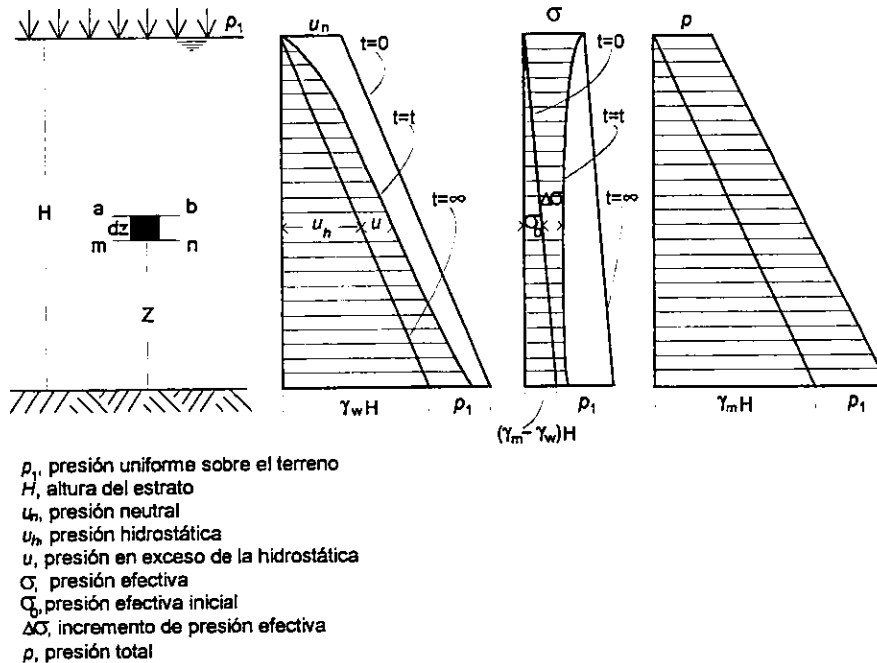


Figura A.4 Estado de esfuerzo en un estrato sujeto a consolidación unidimensional

De la misma fig. A.4 se pueden obtener las relaciones siguientes:

$$\sigma - \sigma_0 = \Delta\sigma \quad \text{A.4}$$

$$u + \Delta\sigma = p_1 \quad \text{A.5}$$

$$u = p_1 - \sigma + \sigma_0 \quad \text{A.6}$$

Si se desea conocer la variación de la sobrepresión, u , con el tiempo, de la ec. A.6 se tiene que:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad \text{A.7}$$

ya que p_1 y σ_0 son constantes durante todo el proceso, según se dijo antes. La notación con derivadas parciales obedece al hecho de que la sobrepresión, u , es también función de la profundidad. El incremento del esfuerzo efectivo con el tiempo, $\frac{\partial \sigma}{\partial t}$, representa un decremento del volumen de vacíos por unidad de volumen inicial (porosidad), n , (según hipótesis no. 6). La relación entre el esfuerzo efectivo, σ , y el volumen de vacíos por unidad de volumen inicial, n , se estableció con anterioridad en la ec. A.3, que al combinarse con la ec. A.7 resulta en:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = m_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{A.8}$$

Las hipótesis de la teoría, establecen que los vacíos del suelo están completamente llenos de agua y que el agua y los sólidos son perfectamente incompresibles; bajo estas condiciones, la disminución del volumen de vacíos por unidad de volumen inicial y por unidad de tiempo que se define por el primer miembro de la ec. A.8 con signo negativo, $-\frac{\partial n}{\partial t}$, representa también la expulsión de agua del elemento de suelo por unidad de volumen inicial y por unidad de tiempo. De la misma ec. A.8 se deduce que la cantidad de agua que se expulsa de un elemento de suelo de espesor dz por unidad de tiempo y por unidad de área es:

$$-\frac{\partial n}{\partial t} dz = -m_v \frac{\partial u}{\partial t} dz \quad \text{A.9}$$

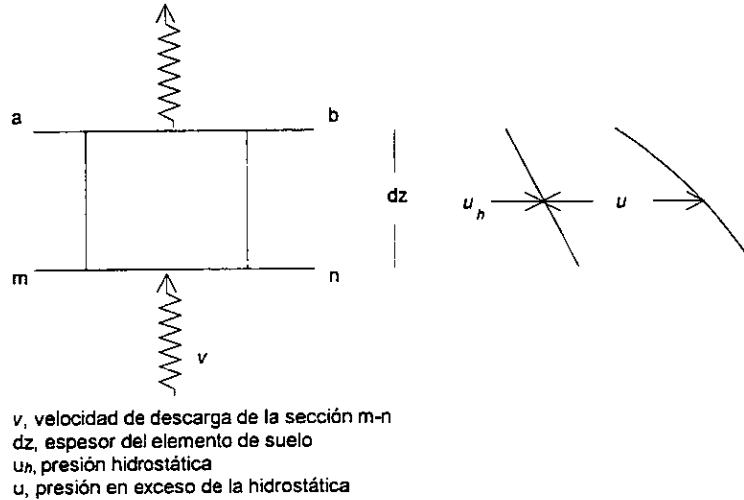


Figura A.5 Estado de esfuerzo en un elemento de suelo sujeto a consolidación unidimensional

Obsérvese ahora la fig. A.5, en la que se amplifica un elemento de suelo de espesor dz y a una profundidad $H-z$, que pertenece a un estrato en consolidación bajo las condiciones ilustradas en la fig. A.4. A través del elemento de suelo, existe flujo de agua; la diferencia entre el agua que entra por la cara inferior (sección m-n) y la que sale por la cara superior (sección a-b) por unidad de tiempo, es igual a la cantidad de agua que se expulsa del elemento de suelo en la misma unidad de tiempo, lo que expresado en términos de la ec. A.9 resulta en:

$$\frac{\partial v}{\partial z} dz = -\frac{\partial n}{\partial t} dz = -m_v \frac{\partial u}{\partial t} dz \quad \text{A.10}$$

donde v , es la velocidad de descarga (de líquido) de la sección m-n y $\frac{\partial v}{\partial z} dz$, representa el incremento de la velocidad de descarga en el espesor dz . La velocidad de descarga se determina con la Ley de Darcy, $v=ki$, donde k es el coeficiente de permeabilidad e i es el gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico para cualquier sección de un estrato de suelo a una profundidad $H-z$ y para un tiempo t , es:

$$i = -\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{A.11}$$

donde el término $1/\gamma_w$ se utiliza para expresar el gradiente en términos de carga hidráulica, y el signo negativo indica que el gradiente disminuye cuando z aumenta; en efecto, si se considera la fig. A.5, se puede observar que la sobrepresión, u , es mayor en la sección n-m que en la a-b, de ello se deduce que en la medida que se tomen secciones superiores del elemento de suelo para un

mismo tiempo, la sobrepresión, u , disminuye, por lo tanto el gradiente hidráulico también disminuye. Con la ec. A.11 y la ley de Darcy se puede establecer que:

$$v = ki = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{A.12}$$

de donde se tiene que la variación de la velocidad de descarga, v , con la profundidad es:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \text{A.13}$$

Si se combinan las ecs. A.10 y A.13, se llega a:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial n}{\partial t} \quad \text{A.14}$$

donde n se definió como la porosidad, $n = \frac{e}{1 + e_0}$, por lo que si se sustituye esta expresión en la ec.

A.14 finalmente se tiene que:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad \text{1.1}$$

que es la ecuación diferencial de la consolidación que se presenta en el capítulo 1, y de donde parte el modelo matemático de Smith y Wahls (1969).

A.4.2 Otra forma de la ecuación diferencial de Terzaghi

Smith y Wahls (1969), no consideran el coeficiente de permeabilidad constante; si ahora se considera válida tal hipótesis, se puede llegar a la forma más común de expresar la ec. 1.1. Así, si k es constante, la ec. A.13 se puede escribir en la forma:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \text{A.15}$$

Si se combinan las ecs. A.10 y A.15 se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{k}{m_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{A.16}$$

que es la forma de la ecuación diferencial de la consolidación de Terzaghi (1943) que se conoce comúnmente. El primer miembro de la ec. A.16 se expresa normalmente en términos del coeficiente de compresibilidad, a_v , tal como se muestra en la ec. 1.2 del capítulo 1:

$$\frac{k(1+e_0)}{a_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{1.2}$$

Para simplificar la nomenclatura de la ec 1.2, Terzaghi (1943) definió el coeficiente de consolidación, c_v , como:

$$c_v = \frac{k(1+e_0)}{a_v \gamma_w} \quad \text{1.22}$$

Por lo que la ec. 1.2 finalmente se puede escribir en su forma más simple si se hace en términos del coeficiente de consolidación:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{A.17}$$

APÉNDICE B

SOLUCIONES DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DE LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

B.1 INTRODUCCIÓN

Se desarrollan en este apéndice, las soluciones de la ecuación diferencial de la consolidación unidimensional 1.3 que se presenta en el capítulo 1. La citada ecuación diferencial se resuelve directamente mediante doble integración con respecto a z , para lo que se deben cumplir las condiciones de frontera según se indica en lo que sigue. Se desarrollan dos soluciones que corresponden al caso simple de sustituir el valor de $b/r=0$ en la ecuación 1.9 que define a la relación de vacíos, así como para el caso de sustituir el término $1+e$ por $1+\bar{e}$ en la ec. 1.3.

Igualmente se trata en este apéndice sobre el desarrollo para obtener la expresión 1.19 del capítulo 1, que define el coeficiente α , en términos del parámetro b/r , el cual se utiliza para el cálculo del valor medio del esfuerzo efectivo en la muestra.

B.2 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DE LA CONSOLIDACIÓN, PARA EL CASO SIMPLE DE SUSTITUIR EL VALOR DE $b/r=0$ EN LA ECUACIÓN 1.9 DE LA RELACIÓN DE VACÍOS

La ecuación diferencial que se pretende resolver es:

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad 1.3$$

donde k es el coeficiente de permeabilidad, γ_w es el peso volumétrico del agua, u es la presión de poro en exceso de la hidrostática, z es la profundidad y e es la relación de vacíos. Smith y Wahls (1969), suponen un comportamiento lineal para la relación de vacíos como función del tiempo y de la profundidad; tal comportamiento se define por la siguiente ecuación:

$$e = e_0 - rt \left[1 - \frac{b}{r} \left(\frac{z - 0.5H}{H} \right) \right] \quad 1.9$$

donde r es la constante de variación de la relación de vacíos media con el tiempo y b es un parámetro del suelo que depende de la variación de la relación de vacíos con la profundidad y el tiempo. Al sustituir el valor de $b/r=0$ en la ec. 1.9 (lo que quiere decir que se supone constante la relación de vacíos con la profundidad), ésta se reduce a la forma:

$$e = e_0 - rt \quad B.1$$

Si se considera la ec. B.1, se tiene que la variación de la relación de vacíos con respecto al tiempo resulta:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -r \quad \text{B.2}$$

Al sustituir la ec. B.2 en la ecuación diferencial de la consolidación 1.3, se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{\gamma_w r}{k(1+e)} \quad \text{B.3}$$

la cual se resuelve directamente mediante doble integración con respecto a z , en lo que se deben cumplir las siguientes condiciones de frontera: $u(0,t) = 0$ y $\frac{\partial u}{\partial z}(H,t) = 0$. Se realiza ahora la primera integración de la ec. B.3:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\int \frac{\gamma_w r}{k(1+e)} dz \quad \text{B.4}$$

en donde γ_w y r son constantes, el coeficiente de permeabilidad, k , es únicamente función del tiempo y de igual forma resulta la relación de vacíos, e , que se expresa por la ec. 1.9. Con las anteriores consideraciones, la integral de la ec. B.4 con respecto a z , conduce a:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\gamma_w r}{k(1+e)} [z + C_1] \quad \text{B.5}$$

Para encontrar la constante C_1 , se aplica la condición de frontera $\frac{\partial u}{\partial z}(H,t) = 0$, de donde se tiene que: $0 = -\frac{\gamma_w r}{k(1+e)} [H + C_1]$, por lo que $C_1 = -H$. Al sustituir el valor de la constante C_1 en la ec. B.5 se tiene que:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\gamma_w r}{k(1+e)} [z - H] \quad \text{B.6}$$

Se presenta a continuación la integración con respecto a z , de la ec. B.6:

$$u = -\int \frac{\gamma_w r}{k(1+e)} [z - H] dz \quad \text{B.7}$$

donde γ_w y r son constantes, y por otra parte k y e no son funciones de z , según se dijo antes, por lo que tal integral resulta:

$$u = \frac{\gamma_w r}{k(1+e)} \left[zH - \frac{z^2}{2} + C_2 \right] \quad \text{B.8}$$

Para encontrar la constante C_2 se aplica la segunda condición de frontera $u(0,t) = 0$, lo que lleva a: $0 = \frac{\gamma_w r}{k(1+e)} (C_2)$; por lo tanto se deduce que $C_2=0$. Al sustituir el valor de la constante C_2 en la ec. B.8, se obtiene finalmente la expresión 1.10 que se presenta en el capítulo 1, la cual define el comportamiento de la presión de poro a cualquier profundidad y tiempo, para el caso de considerar constante la variación de la relación de vacíos con la profundidad; es decir, $b/r=0$:

$$u = \frac{\gamma_w r}{k(1+e)} \left(Hz - \frac{z^2}{2} \right) \quad \text{1.10}$$

B.3 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DE LA CONSOLIDACIÓN, PARA EL CASO DE SUSTITUIR EL TÉRMINO $1+e$ POR $1+\bar{e}$ EN LA ECUACIÓN 1.3

Al sustituir en la ec. 1.3 el término puntual de la relación de vacíos, e , por el valor medio en la muestra, \bar{e} , se tiene que:

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+\bar{e}} \frac{\partial e}{\partial t} \quad \text{B.9}$$

donde \bar{e} no es función de la profundidad. Se obtiene ahora de la ec. 1.9, la variación de la relación de vacíos con el tiempo, que resulta:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -r \left[1 - \frac{b}{r} \left(\frac{z-0.5H}{H} \right) \right] \quad \text{B.10}$$

Al sustituir la ec. B.10 en la B.9 y simplificar, se tiene que:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\gamma_w}{k(1+\bar{e})} \left(-r + \frac{bz}{H} - 0.5b \right) \quad \text{B.11}$$

que resulta una ecuación que se resuelve directamente mediante doble integración con respecto a z , en lo que se deben cumplir las condiciones de frontera que se señalaron anteriormente. Al realizar la primera integración se tiene que:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \int \frac{\gamma_w}{k(1+\bar{e})} \left(-r + \frac{bz}{H} - 0.5b \right) dz \quad \text{B.12}$$

en donde γ_w y r son constantes, además de que k y \bar{e} dependen únicamente del tiempo, por lo que la primera integración de la ec. B.12 conduce a:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\gamma_w}{k(1+\bar{e})} \left(-rz + \frac{bz^2}{2H} - 0.5bz + C_1 \right) \quad \text{B.13}$$

Para encontrar la constante C_1 , se aplica la condición de frontera $\frac{\partial u}{\partial z}(H,t) = 0$, en la ec.

B.13, lo que resulta en: $0 = \frac{\gamma_w}{k(1+\bar{e})} \left(-rH + \frac{bH}{2} - 0.5bH + C_1 \right)$, de donde se obtiene que $C_1 = rH$.

Al sustituir el valor de C_1 en la ecuación B.13 se tiene que:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\gamma_w}{k(1+\bar{e})} \left(-rz + \frac{bz^2}{2H} - \frac{bz}{2} + Hr \right) \quad \text{B.14}$$

Ahora se integra con respecto a z , la ec. B.14:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \int \frac{\gamma_w}{k(1+\bar{e})} \left(-rz + \frac{bz^2}{2H} - \frac{bz}{2} + Hr \right) dz \quad \text{B.15}$$

ecuación en la que γ_w y r son constantes, además que \bar{e} y k no son funciones de la profundidad, así tenemos que tal integral resulta:

$$u = \frac{\gamma_w}{k(1+\bar{e})} \left[-\frac{rz^2}{2} + \frac{bz^3}{6H} - \frac{bz^2}{4} + Hz + C_2 \right] \quad \text{B.16}$$

Para encontrar el valor de la constante C_2 , se aplica la segunda condición de frontera $u(0,t) = 0$ en la ec. B.16, lo que lleva a: $0 = \frac{\gamma_w}{k(1+\bar{e})} [0 + C_2]$, de donde $C_2 = 0$. Al sustituir el valor de C_2 en la ec. B.16 y simplificar, se tiene que:

$$u = \frac{\gamma_w r}{k(1+\bar{e})} \left[\left(Hz - \frac{z^2}{2} \right) - \frac{b}{r} \left(\frac{z^2}{4} - \frac{z^3}{6H} \right) \right] \quad \text{1.14}$$

que es la ecuación que se presenta en el capítulo 1 y que define el comportamiento de la presión de poro en los ensayos de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, considerando

$b/r \neq 0$, así como el valor medio de la relación de vacíos en la muestra en lugar de valores puntuales.

B.4 OBTENCIÓN DE LA EXPRESIÓN PARA EL COEFICIENTE α EN TÉRMINOS DE b/r

En el capítulo 1, se obtuvo la ec. 1.20 con la que se puede calcular el valor medio del esfuerzo efectivo para los ensayos de consolidación con velocidad de deformación constante; esta expresión involucra el coeficiente α , que igualmente se presentó en el capítulo 1 con la ec. 1.19 y que se define como el cociente entre el valor medio de la presión de poro en la muestra, \bar{u} y la presión de poro que se mide en la base, u_b , es decir: $\alpha = \frac{\bar{u}}{u_b}$.

El valor medio de la presión de poro en la muestra para un tiempo t se define en el capítulo 1 como la integral con respecto a z de la presión de poro en un punto u (ec. 1.12), valuada de 0 a H , y dividida entre la altura H , a saber: $\bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u dz$. Se efectúa en primera instancia la integral de la ec. 1.12 con respecto a z :

$$\int_0^H u dz = \frac{\gamma_w r}{k(1+\bar{e})} \int_0^H \left[\left(Hz - \frac{z^2}{2} \right) + \frac{b}{r} \left(\frac{z^3}{6H} - \frac{z^2}{4} \right) \right] dz \quad \text{B.17}$$

Al efectuar la integral se tiene que:

$$\int_0^H u dz = \frac{\gamma_w r}{k(1+\bar{e})} \left[\left(\frac{Hz^2}{2} - \frac{z^3}{6} \right) - \frac{b}{r} \left(\frac{z^3}{12} + \frac{z^4}{24H} \right) \right] \Big|_0^H \quad \text{B.18}$$

aplicando los límites y simplificando:

$$\int_0^H u dz = \frac{\gamma_w r}{k(1+\bar{e})} \left[\left(\frac{H^3}{3} \right) - \frac{b}{r} \left(\frac{H^3}{24} \right) \right] \quad \text{B.19}$$

Se divide la ec. B.19 entre la altura H para finalmente obtener la expresión del valor medio de la presión de poro en la muestra:

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u dz = \frac{\gamma_w r}{k(1+\bar{e})} \left[\left(\frac{H^2}{3} \right) - \frac{b}{r} \left(\frac{H^2}{24} \right) \right] \quad \text{1.17}$$

Para llegar a la expresión del coeficiente α , basta dividir la ec. 1.17 entre la ec. que representa la presión de poro que se mide en la base; esta última se obtuvo en el capítulo 1, a saber:

$$u_{z=H} = u_b = \frac{\gamma_w r H^2}{k(1+\bar{e})} \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12} \right) \right] \quad 1.15$$

Finalmente se divide la ec. 1.17 entre la ec. 1.15 para obtener la expresión del coeficiente α en términos de b/r , lo que resulta:

$$\alpha = \frac{\bar{u}}{u_b} = \frac{\frac{1}{H} \int_0^H u dz}{u_b} = \frac{\frac{1}{3} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{24} \right)}{\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12} \right)} \quad 1.19$$

que es la expresión que se presenta en el capítulo 1 y que se utiliza en la obtención del valor medio del esfuerzo efectivo en la muestra (ec 1.20).

APÉNDICE C

EJEMPLO DE CÁLCULO DE VELOCIDAD CONSTANTE DE DEFORMACIÓN PARA UN ENSAYE VCD

C.1 PANORAMA GENERAL

Una de las variables en las que se ha puesto mayor atención desde la aparición de la prueba de consolidación con velocidad constante de deformación, VCD, es precisamente la velocidad, R , con que deben realizarse los ensayos. Lo anterior obedece al hecho de que el método de análisis de Smith y Wahls (1969) será menos preciso en la medida que se rebase cierto valor del cociente que forman la presión de poro que se mide en la base y la presión total, u_b/p . En general, se acepta el 30% como valor límite para el citado cociente u_b/p .

De ensayos previos, se ha observado que existe una estrecha relación entre la velocidad de ensaye, R , a que se someten las muestras y la presión de poro que en éstos se genera; así, se puede afirmar que para un suelo en particular, mayores velocidades de deformación generan en el espécimen mayores presiones de poro, por tanto mayores valores de u_b/p .

De lo anterior, se desprende la importancia de la adecuada selección de velocidad, R , con que se debe ensayar cada tipo de suelo en las pruebas VCD; para ello existen dos criterios: el primero consiste en seleccionar la velocidad con base en los resultados observados de ensayos previos, los cuales se encuentran con facilidad en la literatura; el segundo criterio consiste en calcular la velocidad de deformación, R , en forma analítica, por medio de algún método existente.

Es precisamente un ejemplo de selección de velocidad mediante el cálculo analítico de Smith y Wahls (1969), el que se aborda en este apéndice. Ambos investigadores encontraron una expresión para calcular la velocidad de deformación adecuada para un tipo particular de suelo en los ensayos VCD. La expresión referida es la ec. 1.30, cuya obtención se explica ampliamente en el capítulo 1.

$$R = \frac{c_v c_c}{m^2 H_0 (1 + e_0)} \left(\frac{\frac{u_b}{p}}{1 - 0.7 \left(\frac{u_b}{p} \right)} \right) \quad 1.30$$

De la ec. 1.30, se observa que para estimar la velocidad, R , deben establecerse algunos parámetros del suelo: H_0 es la altura inicial de la muestra, e_0 es la relación de vacíos inicial, m es una constante; el valor de u_b/p , corresponde al máximo deseado, para el ejemplo se considera el 15%. Los valores del coeficiente de consolidación, c_v , y del índice de compresión c_c , se pueden estimar por medio de gráficas que los correlacionan con el contenido natural de agua, con el límite líquido, con el índice plástico, con la relación de vacíos y con menos frecuencia con la gravedad específica de los sólidos, para distintos tipos de suelo (Carter y Bentley, 1991); para el ejemplo se utilizaron gráficas de correlación con el contenido natural de agua para la arcilla de la ciudad de México (Marsal y Mazari, 1959).

En los incisos que siguen, se presentan las gráficas para estimar los parámetros atinentes, con lo que finalmente se puede calcular la velocidad R .

C.2 GRÁFICAS PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN c_v

El cálculo de velocidades constantes de deformación, R , para ensayos VCD, tales que no se rebase cierto límite de la relación u_b/p , se efectúa con la ec. 1.30. La citada ecuación involucra el conocimiento *a priori* del coeficiente de consolidación, c_v ; evidentemente este valor debe ser estimado, para ello existen en la literatura gráficas que correlacionan contenidos naturales de agua del suelo contra c_v .

En las figs. C.1, C.2 y C.3, se presentan gráficas de correlación del coeficiente de consolidación en el tramo de preconsolidación, en el tramo virgen y el valor medio contra el contenido natural de agua en %, para arcillas de la cd. de México. Dichas gráficas fueron tomadas de la obra monumental de los Profesores Marsal y Mazari (1959). Cada gráfica se complementa con el polígono de frecuencias y valores estadísticos del muestreo.

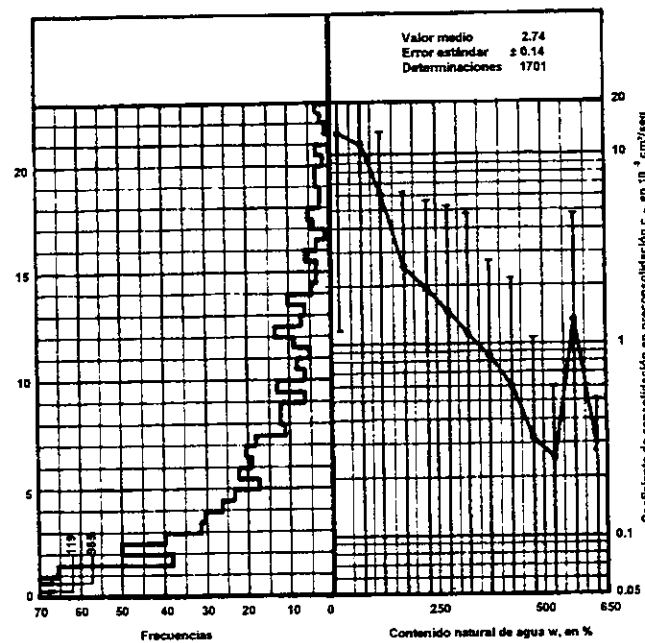


Figura C.1 Coeficiente de consolidación en la etapa de preconsolidación contra contenido natural de agua. Subsuelo de la ciudad de México (Marsal y Mazari, 1959)

El valor del coeficiente de consolidación, c_v , que se estime para el cálculo de la velocidad en ensayos VCD utilizando la ec. 1.30, debe corresponder al que exista en el momento en que la relación u_b/p máxima previamente fijada por el usuario se presente; por ejemplo, para un valor máximo $u_b/p=15\%$, debe estimarse el c_v en la etapa del ensayo en que dicho valor se alcance. Es conveniente señalar que las relaciones u_b/p máximas en tres de los ensayos realizados en este trabajo sucedieron en la etapa de preconsolidación (figs. 4.9, 4.10 y 4.11, capítulo 4); sin embargo,

se justifica ampliamente estimar valores c_v en el tramo virgen, ya que éstos corresponden a los más bajos, y atendiendo a la forma de la ec. 1.30, las velocidades que se calculen serán menores. Para el ejemplo que se presenta en este apéndice, el c_v se calculó para el tramo virgen (fig. C.2).

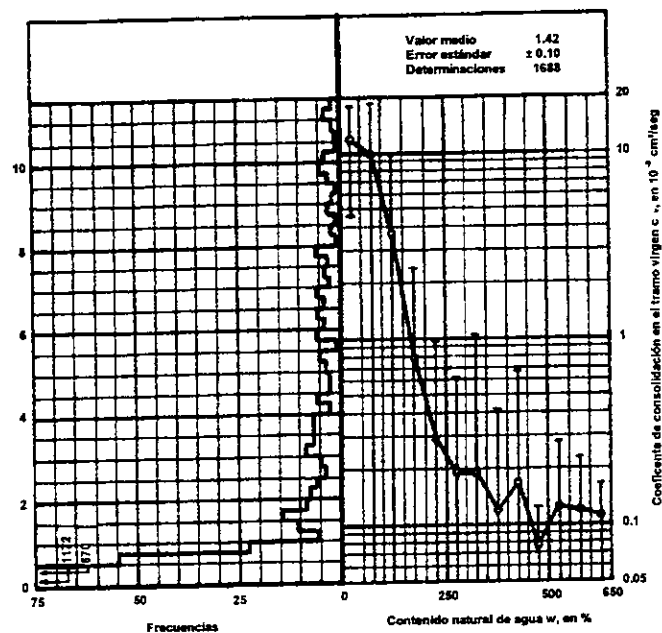


Figura C.2 Coeficiente de consolidación en el intervalo virgen, contra el contenido natural de agua. Subsuelo de la ciudad de México (Marsal y Mazari, 1959)

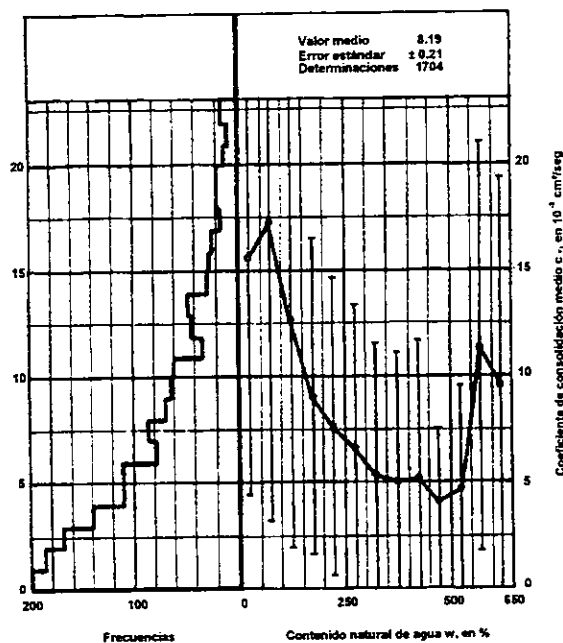


Figura C.3 Coeficiente de consolidación medio contra el contenido natural de agua. Subsuelo de la ciudad de México (Marsal y Mazari, 1959)

C.3 GRÁFICAS PARA ESTIMAR EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN c_c

De la misma forma que se requiere en la ec. 1.30 el conocimiento *a priori* del coeficiente de consolidación para el cálculo de la velocidad de ensaye, R , se requiere también conocer el valor del índice de compresión, c_c .

Por lo anterior se presentan las figs. C.4 y C.5; la primera corresponde a una gráfica con la que se puede estimar el índice de compresión c_c de un suelo (pendiente de la porción lineal de la rama virgen de la curva de compresibilidad) conocido el contenido natural de agua. En esta gráfica, presentada originalmente por Mesri y Rokshar (1974), se observan varios recuadros que corresponden al comportamiento de 16 diferentes tipos de suelos en los que se realizaron múltiples pruebas de consolidación; así mismo se observan dos líneas de comportamiento de dos diferentes depósitos y una franja entre líneas discontinuas (Moran *et al*, 1958) que pretende generalizar las tendencias que se observaron. Nótese que para la arcilla de la ciudad de México (recuadro 4), el índice de compresión varía entre 2 y 9 para un contenido de agua entre 400 y 500%.

En la fig C.5 se muestra la relación del índice de compresión contra el contenido natural de agua para muestras remoldeadas de arcillas de la ciudad de México (Marsal y Mazari, 1959). Esta gráfica tiene la ventaja de presentar una sola línea de tendencia con su correspondiente ecuación de regresión lineal, facilitando así el proceso de estimación del índice mencionado.

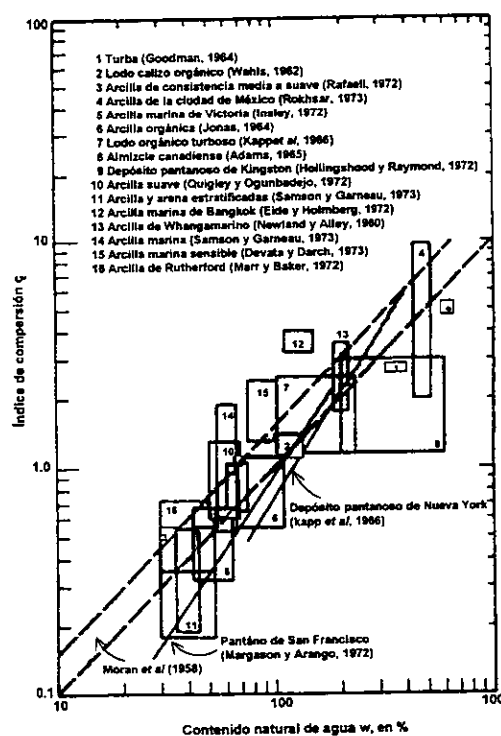


Figura C.4 Índice de compresión para depósitos naturales de suelo (Mesri y Rokshar, 1974)

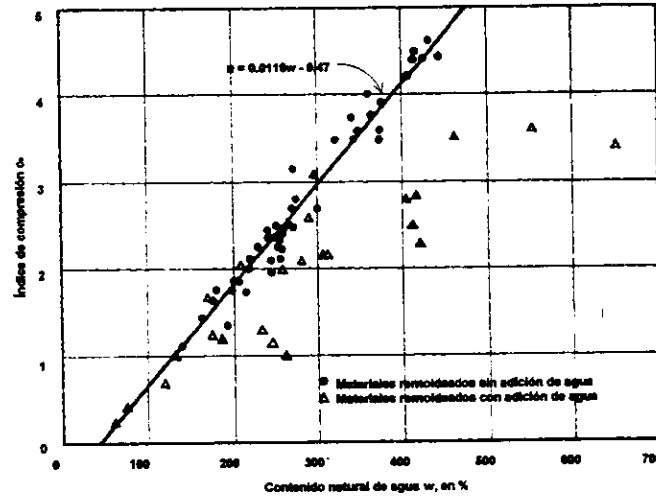


Figura C.5 Índice de compresión contra contenido natural de agua para muestras remoldadas de arcilla de la cd. de México (Marsal y Mazari, 1959)

C.4 EJEMPLO DE CÁLCULO

En el ensayo de consolidación VCD que se realizó a la arcilla del Hospital Juárez, el cual se analiza en el capítulo 4, se eligió una velocidad de ensayo $R=0.01$ mm/min; dicha velocidad no se calculó con el método de Smith y Wahls (1969) sino que se eligió atendiendo a otros ensayos de referencia. A la postre, la velocidad $R=0.01$ mm/min resultaría inadecuada para este tipo de suelo, pues se desarrollaron relaciones u_b/p mayores al 50%, (fig. 4.12), siendo que el límite que recomienda la norma ASTM D4186 (1989) es del 30%.

Se presenta ahora el cálculo de una nueva velocidad de ensayo para este mismo suelo con la que teóricamente no se debe rebasar la relación $u_b/p=15\%$.

De la ec. 1.30, se requiere conocer previamente el coeficiente de consolidación, c_v , y el índice de compresión, c_c , según se ha dicho antes:

$$R = \frac{c_v c_c}{m^2 H_0 (1 + e_0)} \left(\frac{\frac{u_b}{p}}{1 - 0.7 \left(\frac{u_b}{p} \right)} \right) \tag{1.30}$$

El valor máximo deseado de la relación u_b/p se deberá elegir en el rango entre 3 y 30% (ASTM D4186, 1989) y dependerá de las necesidades de tiempo que se requieran para la prueba; en este caso se toma el valor máximo igual a 15%. La constante m , que representa el porcentaje de altura que tendría la muestra al alcanzarse el límite $u_b/p=15\%$, se elige igual a 0.7.

Los datos que se conocen de la arcilla de Hospital Juárez son:

$$w\%=268$$

$$e_0=6.1$$

$$H_0=2.684 \text{ cm}$$

Debido a que se conoce el contenido natural de agua, w , bastará con referirse a cualesquiera de las figs. C.1 a C.3 para determinar el valor del coeficiente c_v que se presentaría en el momento de alcanzar el valor $u_b/p=15\%$. Para el caso particular de este ejemplo, se determina el coeficiente mediante la fig C.2 que corresponde a la rama virgen, de esta forma se obtiene el valor más bajo de c_v igual a $0.19 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$. De manera análoga se determina el índice de compresión c_c mediante la fig C.5 obteniendo el valor de 2.64.

Al sustituir los datos en la ec. 1.30 y simplificar, se tiene que:

$$R = \frac{\left(0.19 \times 10^{-3} \frac{\text{cm}^2}{\text{seg}}\right) (2.64)}{(0.7)^2 (2.684 \text{ cm}) (1 + 6.1)} \left[\frac{0.15}{1 - 0.7 (0.15)} \right] = 0.0051 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

que como se esperaba, resulta una velocidad menor a la empleada inicialmente de 0.01 mm/min, de manera que si se ensayase nuevamente una muestra del mismo suelo empleando ahora la velocidad de 0.0051 mm/min, se presentarían relaciones u_b/p menores a las exhibidas con la velocidad de 0.01 mm/min, además de que teóricamente deberían ser menores al 15%.

REFERENCIAS

- ASTM (1989), "One-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading", Annual book of ASTM standards 1991, D4186-89, pp. 565-569, Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos de América.
- ASTM (1990), "One-dimensional consolidation properties of soils", Annual book of ASTM standards 1991, D2435-90, pp. 297-307, Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos de América.
- Carter, M., y Bentley, S. P. (1991), "Correlations of soil properties", Pentech Press, pp. 55-75, Londres, Inglaterra.
- Crawford, C. B. (1964), "Interpretation of the consolidation test", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 90, no. SM5, septiembre, pp. 87-102.
- Crawford, C. B. (1965), "The resistance of soil structure to consolidation", Canadian Geotechnical Journal, vol. II, no. 2, mayo, pp. 90-97, Ottawa, Canadá.
- Chan, C. K., y Sousa, J. B. (1992), "State-of-the-art on geotechnical laboratory testing", Geotechnical Engineering Division of ASCE, pp 1057-1076.
- Hamilton, J. J., y Crawford, C. B. (1959), "Improved determination of preconsolidation pressure of a sensitive clay", STP, ASTM, no. 254, pp. 254-270, Filadelfia, Estados Unidos de América.
- Janbu, N., Tokheim, O., y Senneset, K. (1981), "Consolidation test with continuous loading", Memorias de la Décima Conferencia Internacional sobre Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, vol. 1, pp. 645-654, Estocolmo, Suecia.
- Juárez, E., y Rico, A. (1974), "Mecánica de suelos", tomo I, 13 reimpresión, pp. 245-328, Editorial Limusa, México D.F., México.
- Lambe, T. W., y Whitman, R. V. (1972), "Mecánica de suelos", Limusa-Wiley, México D.F., México.
- Larsson, R. (1981), "Drained behaviour of swedish clays", reporte no. 12, julio, pp. 7-83, Instituto Geotécnico Sueco, Linköping, Suecia.
- Lee, K. (1981), "Consolidation with constant rate of deformation", Géotechnique, vol. 31, junio, pp. 295-329.
- Leroueil, S. (1988), "Recent developments in consolidation of natural clays", lectura presentada para la Décima Reunión Anual de la Sociedad Canadiense de Geotecnia, 23 pp., Universidad Laval, Quebec, Canadá.
- Marsal, R. J., y Mazari, M. (1959), "El subsuelo de la ciudad de México", Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Mendoza, M. J. (1984), "Compressibility properties of clayey soils used in land reclamation", reporte interno como investigador visitante, marzo, 45 pp., Instituto Geotécnico Sueco, Linköping, Suecia.
- Mendoza, M. J., y Hartlén, J. (1985), "Compressibility of clayey soils used in land reclamation", Memorias de la Decimoprimer Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, vol. 2, pp. 583-585, San Francisco, California, Estados Unidos de América.

- Mendoza, M. J., Ibarra, E., Noriega, I., y Orozco, M. (1996), "Consolidación bajo velocidad constante de deformación: una técnica alternativa", Memorias de la XVIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, vol. 1, pp. 407-414, noviembre, Morelia, Michoacán, México.
- Mesri, G., y Feng, T. W. (1986), discusión de "Strees-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays" *Géotechnique*, vol. 36, no. 2, pp. 283-290.
- Mesri, G., y Feng, T. W. (1992), "Constant rate of strain consolidation testing of soft clays", volumen Marsal, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp. 49-59, México D. F., México.
- Paniagua, W., y Jaime, A. (1991), "Consolidómetro con medición de presión de poro", reporte D-94, febrero, 13 pp., División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Sällfors, G. (1975), "Preconsolidation pressure of soft high-plastic clays", tesis doctoral, Universidad Tecnológica de Chalmers, Gotenburgo, Suecia.
- Sheahan, T. C. y Watters, P. J. (1997), "Experimental verification of CRS consolidation theory", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, no. 5, mayo, pp. 430-437.
- Smith, R. E., y Wahls, H. E. (1969), "Consolidation under constant rates of strain", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol. 95, no. SM2, marzo, pp. 519-539.
- Terzaghi, K. (1943), "Theoretical soil mechanics", John Wiley and Sons Inc., pp. 265-296, Nueva York, Estados Unidos de América.
- Umehara, Y., y Zen, K. (1980), "Constant rate of strain consolidation for very soft clayey soils", *Soils and Foundations*, vol. 20, no. 2, junio, pp. 79-95.
- Wahls, H. E., y De Godoy, N. S. (1965), discusión de "Interpretation of the consolidation test", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol. 91, no. SM3, mayo, pp. 147-152.
- Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., y Heiberg, S. (1971), "Analysis of consolidation at constant strain rate", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol. 97, no. SM10, octubre, pp. 1393-1413.
- Znidarcic, D., Croce, P., Pane, V., Ko, H. Y., Olsen, H. W., y Schiffman, R. L. (1984) "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: III. Existing testing procedures and analyses", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, vol. 7, no. 3, septiembre, pp. 123-133.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la convivencia y ayuda de mis amigos de CENAPRED y del Instituto de Ingeniería:

Ignacio Noriega Rioja, Marcos Orozco Calderón, Leobardo Domínguez Morales, Gustavo E. Cano Treviño, José A. Zepeda Ramos, señor Antonio Sánchez, señor Guillermo Hiriart, Jorge J. Sandoval Álvarez, Manuel A. Flores Ortiz, Juan M. Velasco Miranda.

Por la revisión y atinada dirección de esta tesis, reconozco al M.I. Manuel J. Mendoza López.

A la Facultad de Ingeniería, a mis profesores y amigos.

Gracias

Enrique Ibarra R.